

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



FEUP

Controlo Autónomo de Tráfego Aéreo para Veículos Inteligentes Utilizando o Microsoft Flight Simulator X

Pedro Daniel Pereira Alves de Sousa

Mestrado Integrado em Engenharia Informática e de Computação

Orientador: Luis Paulo Gonçalves dos Reis (Professor Auxiliar, FEUP)

Co-Orientador: Daniel Augusto Gama de Castro Silva (Doutorando, FEUP)

28 de Junho de 2010

Controlo Autónomo de Tráfego Aéreo para Veículos Inteligentes Utilizando o Microsoft Flight Simulator X

Pedro Daniel Pereira Alves de Sousa

Mestrado Integrado em Engenharia Informática e de Computação

Aprovado em provas públicas pelo Júri:

Presidente: Rosaldo José Fernandes Rossetti (Professor Auxiliar Convidado)

Vogal Externo: Artur José Carneiro Pereira (Professor Auxiliar)

Orientador: Luis Paulo Gonçalves dos Reis (Professor Auxiliar)

23 de Julho de 2010

Resumo

O controlo de tráfego aéreo é uma actividade bastante desgastante e *stressante* para os diversos controladores espalhados pelo mundo. O seu principal objectivo é orientar e monitorizar aeronaves que circulem no ar ou em terra, garantindo um fluxo ordenado e seguro de todas as aeronaves envolvidas. Porém, prevê-se que nos próximos anos, à semelhança de anos anteriores, o volume de tráfego aéreo a circular sobre uma determinada região irá aumentar significativamente. Este aumento pode aumentar a dificuldade, já existente, do trabalho dos controladores aéreos.

Nos últimos anos têm surgido sistemas que vêm prestar um grande apoio aos controladores, providenciando um fluxo de informação mais rápido e eficaz, assim como filtragem dessa mesma informação. A utilização destes sistemas como apoio à decisão é uma mais-valia para os controladores. No entanto, a utilização de sistemas deste tipo pode não ser suficiente para acompanhar o aumento do tráfego nos próximos anos. Desta forma, a automatização de alguns processos relacionados com a gestão do tráfego aéreo aparenta ser uma boa solução para esse problema. Vários autores têm já iniciado investigações no sentido de definir que metodologias usar para este cenário, avançando com algumas possíveis soluções práticas.

Esta Tese de Mestrado vem apresentar um tipo de sistema que poderá ser utilizado para a gestão autónoma do controlo de tráfego aéreo. Este sistema é baseado numa estrutura multi-agente. Numa primeira fase desta tese foi efectuado um estudo sobre as diversas componentes do tema “Controlo de Tráfego Aéreo” de forma a perceber quais as entidades mais relevantes para o tema. Foram também estudados os protocolos e procedimentos utilizados actualmente para a gestão do tráfego aéreo com o objectivo de adquirir conhecimentos sobre as diferentes etapas e respectivas acções dos controladores de tráfego para efectuarem a gestão das aeronaves.

Numa segunda fase foi efectuado um estudo dos sistemas que actualmente ajudam os controladores na gestão do tráfego aéreo e ainda várias ideias e propostas de métodos capazes de efectuar uma gestão do tráfego de forma automatizada. Vários destes métodos são apresentados nesta Tese. A fase seguinte correspondeu à implementação de um sistema capaz de efectuar o controlo de tráfego aéreo. Este sistema permite gerir todas as movimentações das aeronaves em terra assim como conceder licenças para as aeronaves aterrarem ou levantarem de um determinado aeroporto. O sistema possibilita a introdução de qualquer aeroporto, bastando para isso definir a sua estrutura, indicando as *taxiways*, *runways* e *parking spaces* existentes no aeroporto. Com esta implementação, esta tese vem mostrar que a utilização de um sistema multi-agente, para automatizar o controlo do tráfego aéreo é possível.

Abstract

Air traffic control is a very strenuous and stressful activity for controllers around the world. Their main purpose is to guide and monitor aircraft movement in the air or on land, ensuring a safe and orderly flow of all aircraft involved. However it's expected that in coming years, as in previous years, the volume of traffic on certain regions will increase significantly. This event may increase the difficulty of insuring safety and order of all aircrafts in movement.

In recent years, several systems designed to support controllers tasks have been created, providing a faster flow of information. The use of these systems as decision support for controllers bring a lot of benefits. However the use of such systems may not be sufficient to keep up with traffic growth in the years ahead. Thus the automation of some processes related to air traffic management appears to be a good solution for this problem. Several authors have already begun investigations for the development of methodologies and processes for this purpose. Some practical solutions have already been created.

This thesis presents a system that can be used for autonomous management of the air traffic control. This proposed system is based on a multi-agent structure. Initially this work began with the study of the various components of the theme " Air Traffic Control", in order to understand which entities are most relevant to the topic. Also, protocols and procedures currently used for air traffic management were studied, in order to gain knowledge about the different steps, and consequent actions, that air traffic controllers carry out for the management of aircrafts.

As the next step, a survey was conducted regarding systems that currently help traffic controllers manage air traffic. Several ideas and proposals of methods for automation of traffic management were also studied and are presented in this work. The next step corresponds to implementation of the system capable of performing air traffic control. This system allows to manage all the movements of aircraft on land and grant permissions for aircraft landing or takeoff from a given airport. The system supports any airport, if provided information indicating the existing *taxiways*, *runways* and parking spaces in the airport. With this work is possible to conclude that the use of a multi-agent system to automate the air traffic control is possible and may be a good strategy to oppose with the progressive increase of air traffic in the next years.

Agradecimentos

Agradeço ao meu co-orientador, Daniel Castro Silva, por todo o incentivo que me foi dando durante todo o desenvolvimento da tese, todas as sugestões e indicações que foram dadas e acima de tudo a simpatia e disponibilidade em todas as ocasiões. Agradeço também ao meu orientador, Luis Paulo Reis, pelo incentivo em escrever um artigo para uma conferência, que já na elaboração deste documento se encontra publicado.

Um forte abraço aos meus colegas e acima de tudo amigos da FEUP, em especial à Ana Barbosa, Catarina Saraiva e Marco Cunha, por todo o apoio dado e momentos passados ao longo dos cinco anos do curso.

Aos meus amigos de todos os grupos onde me encontro envolvido pela ausência em algumas ocasiões durante o desenvolvimento desta tese.

Aos avaliadores da conferência CISTI por terem aceite o meu artigo, aumentando a minha motivação para continuar este projecto.

Finalmente, agradecer do fundo do coração aos meus pais e aos meus irmãos por toda a paciência dada em todo o decorrer deste projecto e do curso. O meu muito obrigado.

Pedro Daniel Sousa

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Motivação	4
1.3	Objectivos	4
1.4	Estrutura da Dissertação	5
2	Controlo de Tráfego Aéreo	7
2.1	Conceitos	7
2.1.1	Controlo de Tráfego Aéreo	7
2.1.2	Espaço Aéreo	7
2.1.3	Controlador de Tráfego Aéreo	8
2.1.4	Aeroporto	9
2.1.4.1	<i>Runway</i>	9
2.1.4.2	<i>Taxiway</i>	15
2.1.4.3	Torre de Controlo	15
2.1.5	Fases do voo	16
2.1.6	Corredores de circulação	17
2.2	Modelo de ATC actuais	19
2.2.1	Modelo Americano	19
2.2.1.1	TRACON	19
2.2.1.2	ARTCC	21
2.2.1.3	ATCSCC	22
2.2.1.4	ATCT	23
2.2.2	Modelo Europeu	24
3	Tecnologias e Sistemas de ATM	27
3.1	ACAMS	27
3.2	NAV CANADA	28
3.3	BAE Systems	29
3.4	Ifield Computer Consultancy	30
3.5	Tern Systems	32
3.6	NITA	34
3.7	SmartGlobe	35
4	ATC baseado em agentes	37
4.1	Agentes inteligentes no ATC	37
4.2	Agentes nas torres de controlo (ATCT)	38

CONTEÚDO

4.3	Controlo do espaço envolvente das aeronaves	38
4.4	Distribuição dos agentes por sectores	40
4.4.1	Sectores periféricos	41
4.4.2	Transição entre sectores periféricos	41
4.4.3	Passagem para sector central	42
4.5	Estratégias de separação	43
4.5.1	Estratégia centralizada	43
4.5.2	Estratégia descentralizada	44
4.6	Outros estudos	45
5	Arquitectura/Sistemas	49
5.1	Simulação	49
5.1.1	Microsoft Flight Simulator X	49
5.1.2	SimConnect	50
5.2	Comunicação	51
5.3	Visualização	52
6	Detalhes de Implementação	55
6.1	Definição do Aeroporto	55
6.2	Interpretação do Aeroporto	58
6.2.1	Interpretação das <i>taxiways</i>	58
6.2.2	Interpretação das <i>runways</i>	59
6.2.3	Interpretação de outros elementos	60
6.3	Estados das Aeronaves	61
6.4	Protocolos de Comunicação	65
6.4.1	Estrutura das mensagens	65
6.4.2	Protocolo de Taxi	66
6.4.3	Protocolo de Partida	68
6.4.4	Protocolo de Chegada	70
6.5	Procedimentos dos Protocolos	72
6.5.1	Procedimento de Taxi	73
6.5.1.1	Algoritmo de Gestão do Tráfego	75
6.5.2	Procedimento de Partida	76
6.5.3	Procedimento de Chegada	78
6.5.3.1	Manobra Hold Pattern	81
6.6	Utilização do Sistema	83
6.6.1	Inicialização	83
6.6.2	Monitorização	86
7	Casos de Teste	89
7.1	Testes efectuados	89
7.2	Comparação dos resultados	92
8	Conclusões e Trabalho Futuro	95
8.1	Conclusões	95
8.2	Trabalho Futuro	96
	Referências	102

CONTEÚDO

A	Estrutura do Ficheiro de Configuração do Aeroporto	103
A.1	Configuração de <i>Runway</i>	104
A.2	Configuração de <i>Taxiway</i>	105
A.3	Configuração de <i>ParkingSpace</i>	106

CONTEÚDO

Lista de Figuras

1.1	Crescimento Tráfego Aéreo	2
1.2	Previsões do Crescimento de Tráfego Aéreo	2
1.3	Ligações entre Projectos	3
2.1	Desenho Esquemático de um Aeroporto	9
2.2	Rosa-dos-ventos	10
2.3	Estrutura de uma <i>Runway</i>	11
2.4	<i>Runway</i> Simples	11
2.5	Tipos de <i>Runways</i> Paralelas	12
2.6	Aeroporto de Los Angeles	13
2.7	Tipos de <i>Runways</i> em V-aberto	14
2.8	Tipos de <i>Runways</i> que se Interceptam	15
2.9	Imagem Típica de uma Torre de Controlo	16
2.10	Fases de um Voo	16
2.11	Esquema de Corredores de Circulação Aéreos	18
2.12	Espaço TRACON da Califórnia do Norte	20
2.13	Distribuição dos ARTCCs nos Estados Unidos	21
2.14	Densidade do Tráfego Aéreo sobre a Europa	25
2.15	Proposta de Centro de Controlo Europeu a) Proposta FABEC (Esquerda) b) Outras FABs na Europa (Direita)	25
3.1	Sistema EXCDS	29
3.2	Exemplo do Sistema DATS a) Simulador de Radar (Esquerda) b) Simu- lador de ATCT (Direita)	30
3.3	Subsistema ATRAK-IMS	31
3.4	Subsistema ATRAK-BYPASS / PC SYSTEM	32
3.5	Interfaces disponibilizadas pelo Sistema TAS a) Monitorização do Espaço Aéreo (Esquerda) b) Informação dos voos (Direita)	33
3.6	Utilização do TSIM para treinos de ATCOs em Torres de Controlo	34
3.7	Possíveis Interfaces do Sistema EXPERT	35
4.1	Protocolo de Negociação Cooperativa	40
4.2	Estratégia de Separação Centralizada	44
4.3	Estratégia de Separação Descentralizada	45
4.4	Impacto de Desempenho com Sugestões de Agentes	46
4.5	Resultado Experimental do Desempenho dos Algoritmos MPCA e IPPCA	47
5.1	Sistema Cliente-Servidor entre SimConnect e FSX	50

LISTA DE FIGURAS

5.2	Interface - Exemplo de Mensagem Tooltip	52
5.3	Interface - Exemplo de <i>Taxiways</i>	53
6.1	Interface - Control Panel	56
6.2	Interface - Control Panel (Criação do Aeroporto)	57
6.3	Elementos para a Configuração do Aeroporto	57
6.4	Tabela com Caminhos entre Nós do Grafo	59
6.5	Aplicação do algoritmo baseado em Ray Casting	61
6.6	Máquina de Estados das Aeronaves	63
6.7	Diagrama de Sequência - Procedimento de Taxi	66
6.8	Diagrama de Sequência - Procedimento de Partida	68
6.9	Pontos para Entrada na <i>Runway</i>	70
6.10	Diagrama de Sequência - Procedimento de Chegada	71
6.11	Diagrama de Actividades - Procedimento de Taxi	73
6.12	Pseudo-código do Algoritmo de Gestão das <i>Taxiways</i>	75
6.13	Diagrama de Actividades - Procedimento de Partida	77
6.14	Diagrama de Actividades - Procedimento de Chegada	79
6.15	Forma de um Holding Pattern	81
6.16	Distribuição das Possíveis Entradas no Hold Pattern	82
6.17	Tipos de Entrada para o Holding Pattern	82
6.18	aaaaaa	83
6.19	Interface - Janela de Configuração	84
6.20	Exemplo do Ficheiro de Configuração do SimConnect	85
6.21	Interface - Janela de Monitorização	87
7.1	Friday Harbor Airport	90
7.2	Whidbey Island Naval Air Station	91
7.3	Operações por Hora de Simulação	92
7.4	Utilização das <i>Taxiways</i> pelas Aeronaves	94
A.1	Campos para a Configuração de uma <i>Runway</i>	104
A.2	Campos para a Configuração de uma <i>Taxiway</i>	105
A.3	Campos para a Configuração de um <i>ParkingSpaces</i>	106

Abreviaturas e Símbolos

AI	Artificial Inteligence
ARTCC	Air Route Traffic Control Center
ATCSCC	Air Traffic Control System Command Center
ATC	Air Traffic Control
ATCO	Air Traffic COntroller
ATCT	Air Traffic Control Tower
ATM	Air Traffic Management
FAA	Federal Aviation Administration
FABEC	Functional Airspace Block Europe Central
FACET	Future ATM Concepts Evaluation Tool
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
FSX	Microsoft Flight Simulator X
NM	Nautical Miles
SDK	Software Development Kit
SESAR	Single European Sky ATM Research
TRACON	Terminal Radar Approach COntrol
XML	eXtensible Markup Language

ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Capítulo 1

Introdução

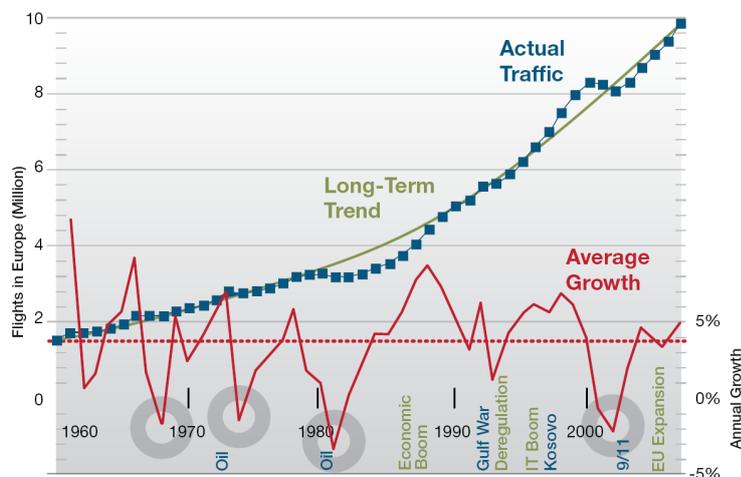
Neste primeiro capítulo é feita uma introdução ao tema desta dissertação, apresentando-se qual o enquadramento no tema e as motivações que levaram à realização desta tese. São também apresentados os objectivos propostos para o trabalho. A última secção apresenta a estrutura deste documento.

1.1 Enquadramento

A utilização do transporte aéreo na Europa, quer seja de passageiros ou mercadorias, apresenta um crescimento médio de 3-4% por ano. No entanto este crescimento não é uniforme, apresentando em diversas ocasiões picos acentuados de decréscimo ou aumento, provocados por acontecimentos de grande impacto a nível Mundial. A crise do petróleo nos anos 70 e 80, a guerra do Golfo, conflitos no Kosovo e o ataque terrorista de 11 de Setembro influenciaram negativamente este crescimento, enquanto que o crescimento económico nos finais de 80, o crescimento tecnológico em meados da década de 90 e mais recentemente a expansão Europeia favoreceram o crescimento do tráfego aéreo de forma positiva [1]. A Figura 1.1 apresenta a variação do tráfego aéreo na Europa nos últimos anos:

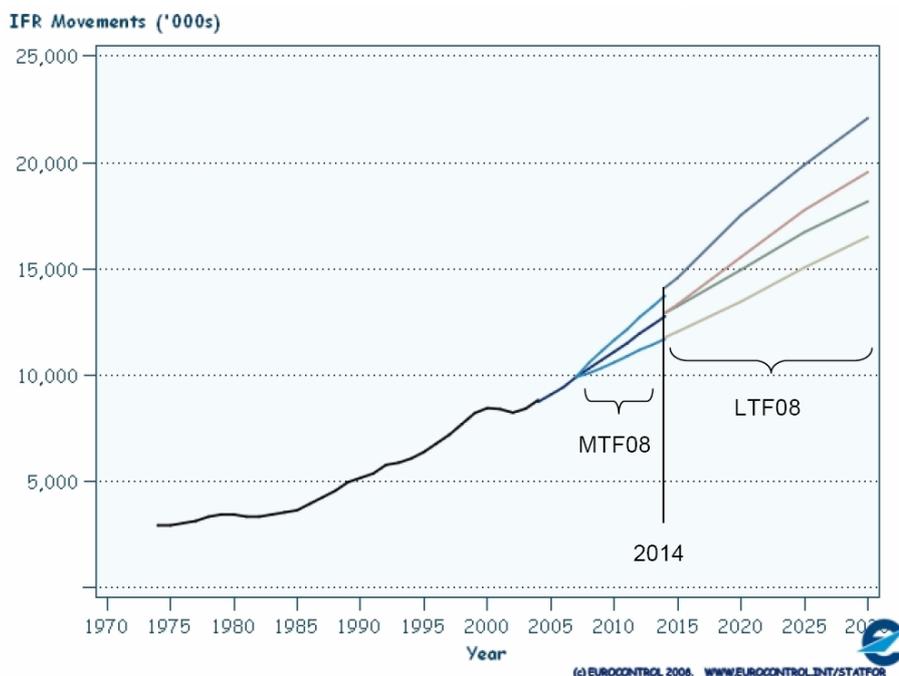
Introdução

Figura 1.1: Crescimento Tráfego Aéreo



Segundo estudos, efectuados pelo STATFOR [1] em 2008, de previsão do crescimento do número de voos anuais a médio (MTF08, até 2014) e longo prazo (LTF08, até 2030) é notório o grande aumento esperado nos próximos anos. A Figura 1.2 apresenta os resultados obtidos deste estudo:

Figura 1.2: Previsões do Crescimento de Tráfego Aéreo

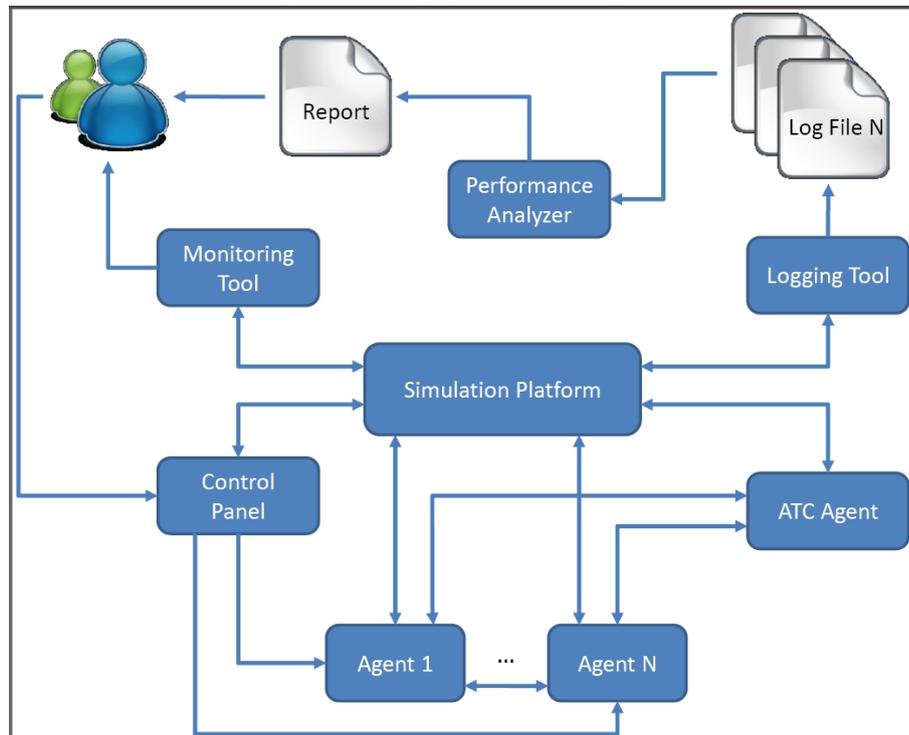


Pelo facto de ser esperado um aumento significativo do tráfego aéreo nos próximos anos torna-se importante assegurar a eficácia da sua gestão, caso contrário poderá levar à

diminuição da viabilidade do transporte aéreo, assim como o incumprimento das diversas normas de segurança, nomeadamente a distância mínima de segurança entre as aeronaves. Como forma de assegurar o correcto funcionamento da gestão do tráfego aéreo (ATM - Air Traffic Management) tem surgido um crescente interesse na automatização destes processos.

Esta tese está relacionada com um projecto de doutoramento também a ser desenvolvido na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, sobre a coordenação de agentes dinâmicos para diferentes tipos de aplicações [2]. A aplicabilidade deste projecto está orientada para a vigilância e operações de busca e salvamento, porém é esperado que seja flexível podendo ser aplicável a outras áreas. Cada agente será responsável por comandar um veículo de forma independente e autónoma, podendo trocar mensagens com outros agentes. Os veículos a serem comandados tanto podem ser terrestres como aéreos. Um dos objectivos finais é a possibilidade de realizar missões, com diferentes equipas de veículos, numa coordenação conjunta. A ligação entre os projectos incide na monitorização e gestão das aeronaves que executam as missões, por parte de um agente controlador de tráfego aéreo (ATC Agent) que comunica com todas as aeronaves existentes. A Figura 1.3 apresenta uma vista de alto nível sobre a forma de ligação entre os dois projectos:

Figura 1.3: Ligações entre Projectos



1.2 Motivação

A existência de Controlo de Tráfego Aéreo (ATC - Air Traffic Control) feito de uma forma automatizada pode ter uma aplicabilidade muito importante para os controladores de tráfego aéreo, por exemplo, se este for usado como um sistema de apoio à decisão. Uma outra aplicação poderá ser na criação de um novo aeroporto, permitindo fazer uma simulação prévia, à sua criação, com o objectivo de comprovar a sua viabilidade e se a estrutura em estudo é a mais adequada.

ATC é uma área que ainda não está muito automatizada apesar de já haver diversas ferramentas e tecnologias para os controladores de tráfego aéreo. No entanto, existe já alguma investigação sobre a utilização de agentes, com inteligência artificial, no controlo e auxílio do ATC. A criação de um sistema de ATC tirando partido dos pontos fortes de cada um dos métodos apresentados, que poderá ser utilizado como meio de simulação ou de apoio à decisão, é uma razão que teve bastante peso para o interesse neste projecto ambicioso.

1.3 Objectivos

Os objectivos deste trabalho incidem na criação de um sistema multi-agente para o controlo de tráfego aéreo. As funcionalidades pretendidas que o sistema possua são:

- **Aceitar configurações variáveis de aeroportos** - partindo da configuração das estruturas de um aeroporto relevantes para o ATC (através de um ficheiro) ser capaz de interpretar e armazenar toda a sua estrutura física. Desta forma torna-se uma aplicação que pode ser aplicável a qualquer aeroporto.
- **Desempenhar várias comunicações em paralelo** - ser capaz de comunicar com diversas aeronaves em simultâneo. Torna-se útil para permitir efectuar aterragens de mais do que uma aeronave em simultâneo, caso seja permitido, ou simplesmente coordenar várias aeronaves em estados diferentes simultaneamente.
- **Gerir aterragens e partidas de aviões no aeroporto** - comunicando com as diferentes aeronaves que apresentem intenções de aterrar ou levantar, atribuir pistas que estejam disponíveis para o efeito. Deverá ser tida em conta a configuração das pistas, para assegurar que não haverá colisões durante a manobra.
- **Admissão de novas aeronaves que entrem no espaço aéreo** - aceitar entrada de novas aeronaves no espaço aéreo, passando a controlar os moviemtnos efectuadas por essas aeronaves.
- **Gerir tráfego das aeronaves em terra** - manter um fluxo ordenado e seguro de todas as movimentações das aeronaves presentes no aeroporto.

1.4 Estrutura da Dissertação

Este documento está dividido em oito capítulos, começando por esta introdução ao tema, apresentando o enquadramento, motivação e objectivos do trabalho. No segundo capítulo é efectuada uma introdução aos diversos conceitos relacionados com o controlo de tráfego aéreo. Estes conceitos serão fundamentais para a compreensão de todo o documento. Neste capítulo, é ainda apresentado o modelo actual dos Estados Unidos para o controlo do tráfego aéreo e ainda uma breve referência ao modelo adoptado na Europa. O terceiro capítulo apresenta diversos sistemas actualmente utilizados pelos controladores de tráfego como sistemas de apoio à decisão ou para treino dos mesmos. O capítulo quatro apresenta diversas ideias e metodologias sugeridas por vários autores para a automatização de vários processos relacionados com a gestão do tráfego aéreo. O quinto capítulo apresenta as diversas plataformas que foram utilizadas para a implementação do sistema proposto seguido de alguns detalhes da implementação no capítulo seis. O capítulo sete apresenta os casos de estudo efectuados sobre o sistema juntamente com alguns comentários sobre os resultados obtidos. Por fim, o capítulo oito, apresenta as conclusões e trabalho futuro desta tese. Existe ainda um anexo que apresenta em maior detalhe os elementos necessário para a configuração do aeroporto em estudo.

Capítulo 2

Controlo de Tráfego Aéreo

Neste capítulo são apresentados os diversos conceitos que estão ligados ao controlo de tráfego aéreo e que serão utilizados neste projecto, assim como dois modelos de ATC usados actualmente nos Estados Unidos e na Europa.

2.1 Conceitos

Para possibilitar um melhor entendimento dos assuntos presentes neste documento é feita de seguida uma apresentação de alguns conceitos relacionados com o controlo de tráfego aéreo assim como apresentar algumas entidades (e suas características) importantes, que tenham relevância neste âmbito.

2.1.1 Controlo de Tráfego Aéreo

O Controlo de tráfego aéreo (ATC) é um conjunto de procedimentos (e tecnologia associada) e pessoas, que pretende garantir as condições de segurança das aeronaves em voo e em terra. O principal objectivo do ATC é o de prevenir acidentes (colisões) de aeronaves, com outras aeronaves ou outros elementos (aves, balões, etc). Outros objectivos secundários são os de organizar e agilizar as deslocações das aeronaves de um aeroporto de partida para o seu destino de modo a diminuir a sua duração e ainda fornecer apoios e informações aos pilotos que sejam pertinentes (condições atmosféricas, alterações de rotas, entre outras) [3].

Como o próprio nome indica esta é a parte central de todo este projecto, pois o sistema resultante deverá controlar várias aeronaves dentro do seu espaço aéreo.

2.1.2 Espaço Aéreo

Cada parte da divisão geográfica do território, por diferentes centros de controlo, corresponde a um espaço aéreo distinto. Cada espaço aéreo é responsável por gerir todas as

entradas, saídas e movimentações das aeronaves dentro dele.

Neste caso as diferenças entre espaços aéreos é importante para o projecto como forma de delimitar o alcance de um determinado centro de controlo, sabendo desta forma quando é que uma aeronave deverá ser “controlada” por este centro ou deixará de o ser. No capítulo 2.2 serão apresentados dois modelos de Gestão de Tráfego Aéreo (ATM), Americano e Europeu, onde a divisão do espaço aéreo é efectuado de maneira diferente.

2.1.3 Controlador de Tráfego Aéreo

O controlador de tráfego aéreo é a pessoa que opera o sistema de gestão do tráfego aéreo de forma a manter um fluxo seguro e ordenado de todo o tráfego e ainda evitar colisões no ar e em terra. Os Controladores de Tráfego Aéreo (ATCOs) prestam o seu serviço em três alturas distintas, cada uma com a sua responsabilidade, tomando decisões em tempo útil sobre todos os voos. Os três momentos são os seguintes:

- Pré-voos, antes da aeronave iniciar a sua marcha;
- Partida ou chegada da aeronave ao aeroporto;
- Durante a sua rota cruzeiro.

O trabalho desempenhado por estes operadores é de extrema importância para o correcto fluxo de tráfego aéreo. Uma causa que pode diminuir substancialmente a concentração destes operadores é a fadiga. Existem diversos factores que podem contribuir para o aumento da fadiga [4], como por exemplo, número reduzido de pessoal, excesso de trabalho, idade, demasiado tempo numa só tarefa, etc.

Com o objectivo de diminuir o nível de fadiga nos ATCOs existem várias recomendações sobre as durações de turnos de trabalho, nomeadamente para os responsáveis de manter a separação entre aeronaves. De seguida são enumeradas algumas dessas recomendações propostas [5] :

- Cada turno não deverá ter duração superior a dez horas;
- Entre o final de um turno e o início do turno seguinte deverá existir um tempo de intervalo de pelo menos oito horas;
- Quando o último turno tiver sido o da noite (maioria das horas de trabalho entre as dez horas da noite e as oito da manhã) deverá haver um intervalo de doze horas.
- Não efectuar mais de seis turnos sem ter usado um dia de folga.

2.1.4 Aeroporto

Um aeroporto é composto por diversos componentes e infra-estruturas (Figura 2.1). Neste capítulo serão apresentadas definições e propriedades de algumas dessas entidades para melhor compreender este projecto.

Figura 2.1: Desenho Esquemático de um Aeroporto



2.1.4.1 Runway

As *runways* (pistas de aterragem) servem, como o próprio nome indica, para efectuar a aterragem da aeronave, em segurança, num determinado espaço de terreno. Porém estas pistas são também utilizadas para as respectivas descolagens. Estas pistas são o essencial para que um aeroporto possa funcionar pois é o que permite que os aviões tenham a velocidade necessária para se sustentarem no ar.

As *runway* podem apresentar diversas configurações que influenciam as acções a serem executadas para efectuar a gestão e controlo do tráfego aéreo. Conforme a sua orientação e relação com outras *runways* (no caso de haver mais do que uma num determinado aeroporto) são necessários ter cuidados distintos no controlo das aeronaves. As configurações possíveis serão apresentadas mais a frente nesta secção.

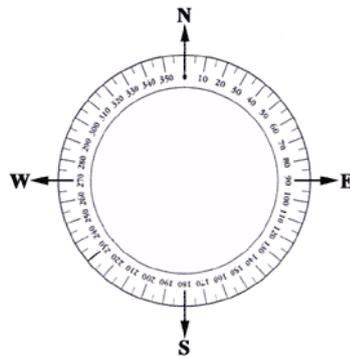
Um princípio básico da física afirma, que todos os corpos, na Terra, são atraídos pela força da gravidade. Para que possam haver aeronaves a voar no ar é necessário compensar essa força. Uma forma de a compensar é com o recurso a asas (com determinadas características) e velocidade. Esta última pode ser alcançada com o uso das *runways* que possibilitam, nos levantamentos, às aeronaves atingirem a velocidade necessária para que consigam compensar a força da gravidade. As *runways* são, no entanto, também utilizadas para o efeito inverso, aterragem das aeronaves, permitindo que estas possam reduzir a sua

velocidade para um valor em que possam fazer manobras em terra e dirigirem-se (pelas *taxiways*) para os respectivos terminais em segurança.

Existem algumas particularidades destas *runways* que são tidas em conta em todos os aeroportos, no entanto algumas configurações específicas podem variar ligeiramente de aeroporto para aeroporto (ou país para país). As configurações apresentadas neste tópico serão referentes ao standard supervisionado pela FAA, entidade reguladora dos Estados Unidos. As diversas características das *runways*, mesmo que com algumas modificações na forma de marcação das mesmas, vêm facilitar e ajudar os pilotos a terem uma melhor percepção das *runways* em que pretendem aterrar ou da qual pretendem levantar [6].

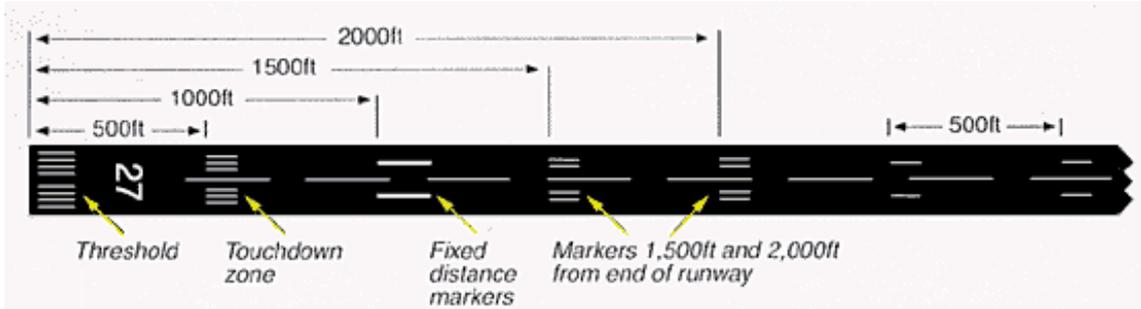
Para a marcação das diversas *runways* de um aeroporto é utilizado como ferramenta uma rosa-dos-ventos. Uma rosa-dos-ventos é uma circunferência (360°) em que 0/360° indica o Norte, 90° o Este, 180° o Sul e 270 para o Oeste, como se pode ver pela Figura 2.2.

Figura 2.2: Rosa-dos-ventos



A marcação de uma determinada *runway* é então feita conforme a sua orientação segundo a rosa-dos-ventos e pintada na extremidade da mesma essa informação. No entanto a indicação não é expressa em graus. Por exemplo, consideremos que a pista está orientada a 190° (praticamente virada para Sul), desta forma o que deverá estar escrito na pista não será o 190 mas apenas 19. Seguindo o mesmo raciocínio, no caso de o valor ser 31 isto indica que a pista está orientada a 310° (praticamente virada para Noroeste). Nos casos em que o valor em graus não seja múltiplo de 10, por exemplo 7° ou 12°, os valores a serem pintados nas pistas são arredondados para o número múltiplo de 10 mais próximo neste exemplo ambos ficariam com o valor 10 pintado na pista. A indicação da orientação da *runway* é precedida de 8 riscas brancas e seguida de 6 riscas brancas, com um espaçamento entre elas de 500 pés (perto de 150 metros). A zona das 6 riscas brancas indica a zona onde a aeronave deverá entrar em contacto com a pista, no momento da aterragem, bastante conhecida como a zona de contacto (“touchdownzone”). A Figura 2.3 ilustra os diversos componentes que fazem parte de uma *runway*.

Figura 2.3: Estrutura de uma *Runway*



Por convenção, quando se falar no início de uma *runway* é considerado o lado oposto em que a aeronave levanta voo, isto é, deixa de estar em contacto com a *runway*. De notar ainda que algumas *runways* podem ser utilizadas por ambos os lados, neste caso cada um dos sentidos da *runway* em questão terá um valor identificador diferente. Existem quatro tipos base de configurações de *runways*, podendo ser criadas com outra estrutura através de junção dos diferentes tipos base, no entanto não pode ser criada qualquer configuração que se queira pois têm de satisfazer alguns requisitos. A configuração das *runways* é importante pois dependendo da sua configuração o número de voos que podem aterrar ou levantar de um aeroporto é diferente. Os diferentes tipos básicos são apresentados nas sub-seções seguintes.

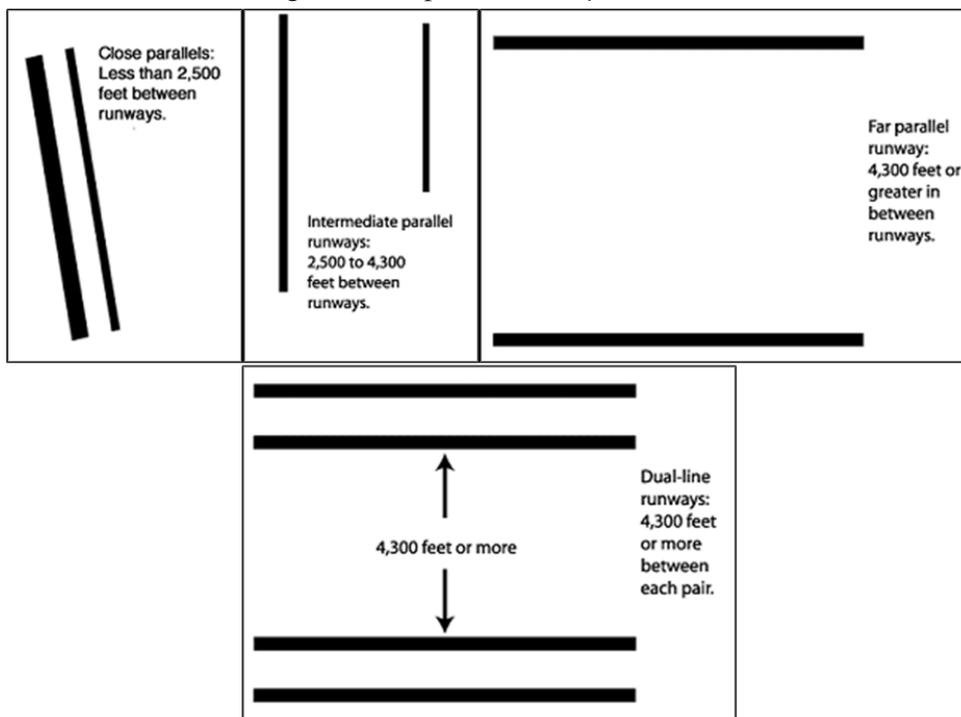
2.1.4.1.1 Runway simples Esta é a configuração mais simples dos tipos base possuindo apenas uma *runway* para as partidas e aterragens das aeronaves. Na construção de uma *runway* deste tipo deverá sempre ter tido em conta factores como o ruído que poderá causar, direcção mais comum dos ventos na zona, facilidade na aproximação à pista (não existirem obstáculos, como por exemplo edifícios, que possam dificultar a aproximação à pista) entre outros factores que possam ser relevantes para a escolha da orientação da pista. Ver Figura 2.4.

Figura 2.4: *Runway* Simples



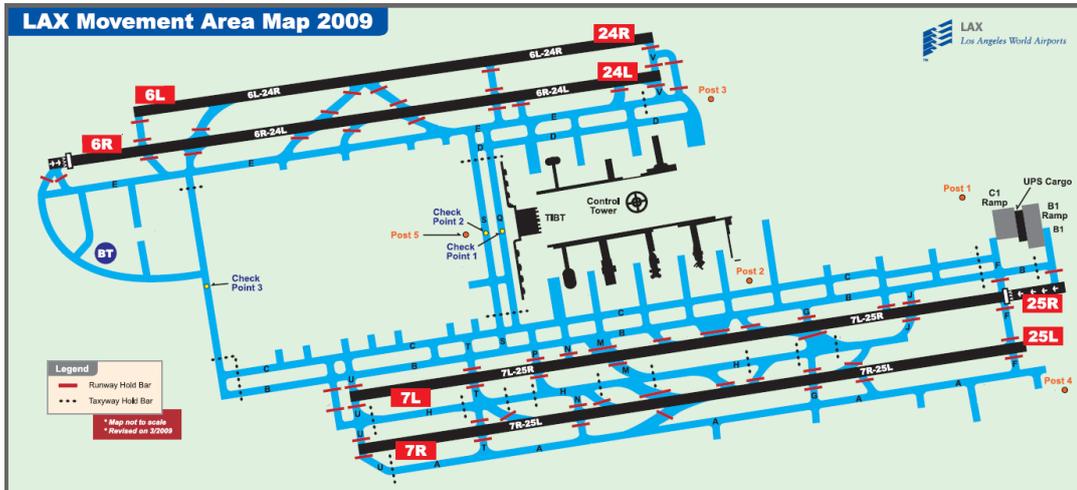
2.1.4.1.2 Runways paralelas Nesta configuração existem três tipos de configurações internas, sendo estas distinguidas pela proximidade das diferentes *runways* entre si. No caso de a distância entre pistas ser inferior a 2500 pés (perto de 760 metros) são chamadas paralelas próximas (*close parallels*), se a distância for superior a 4300 pés (perto de 1310 metros) são consideradas paralelas distantes (*far parallels*). Se a distância for entre as paralelas próximas e as distantes, entre 2500 e 4300 pés são consideradas de paralelas intermédias (*intermediate parallels*). Para a implementação de diversas pistas paralelas, mais do que duas, é necessário ter em conta uma restrição criada para o efeito, que obriga a que dois conjuntos de pistas paralelas possuam, no mínimo, uma distância entre si de 4300 pés (distância equivalente à definição de pistas paralelas distantes). A Figura 2.5 apresenta os quatro tipos diferentes de configurações.

Figura 2.5: Tipos de *Runways* Paralelas



É comum em alguns locais haver uma diferenciação na identificação das *runways* que são paralelas e apresentam o mesmo número identificador. Nestes casos em que se pretende diferenciar são, normalmente, utilizadas as letras 'R' e 'L' para indicar a direita e esquerda respectivamente (*right* e *left*, respectivamente). Em alguns casos quando são várias as *runways* paralelas entre si é costume atribuir um identificador diferente (adicionando ou subtraindo uma unidade à numeração). O aeroporto de Los Angeles é um desses exemplos onde dois pares de pistas paralelas apresentam identificadores diferentes (apresentados nas caixas vermelhas na Figura 2.6).

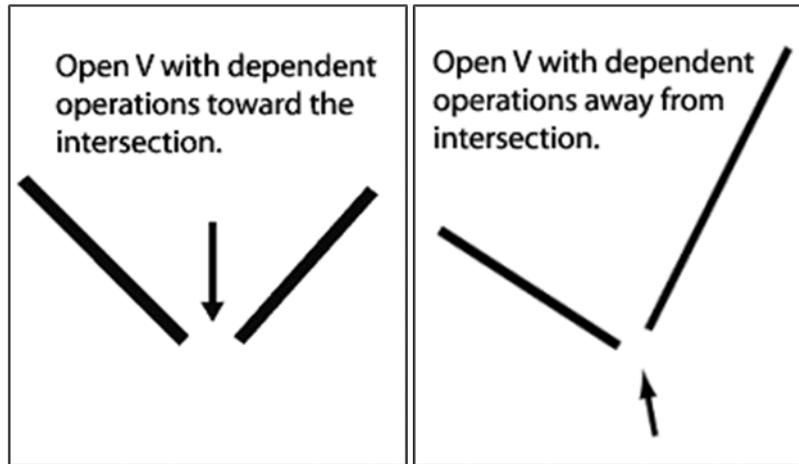
Figura 2.6: Aeroporto de Los Angeles



2.1.4.1.3 Runways em V-Aberto V-Aberto ou, em inglês, open-V são assim denominadas as configurações quando duas *runways*, que tenham direcções diferentes mas que não se interceptam, apresentam uma forma parecida com um V que não está completamente fechado na ponta (as duas *runways* não se interceptam), daí o termo aberto. Esta é uma boa formação a adoptar quando é recorrente a existência de ventos não apenas numa direcção, desta forma, se o vento sobre uma das *runways* for demasiado elevado apenas uma das *runways* é utilizada. Quando não há presença de ventos ambas podem ser utilizadas, aumentando assim a taxa de utilização e capacidade de efectuar aterragens ou descolagens.

Com esta configuração em V existem duas formas de utilização, dependendo por que lado da pista é que são feitas as aterragens ou descolagens. Se estas operações ocorrerem pelo lado que forma a ponta do V o número de aterragens e descolagens que podem ser efectuados num determinado espaço de tempo é superior no caso inverso. A Figura 2.7 explica esta situação.

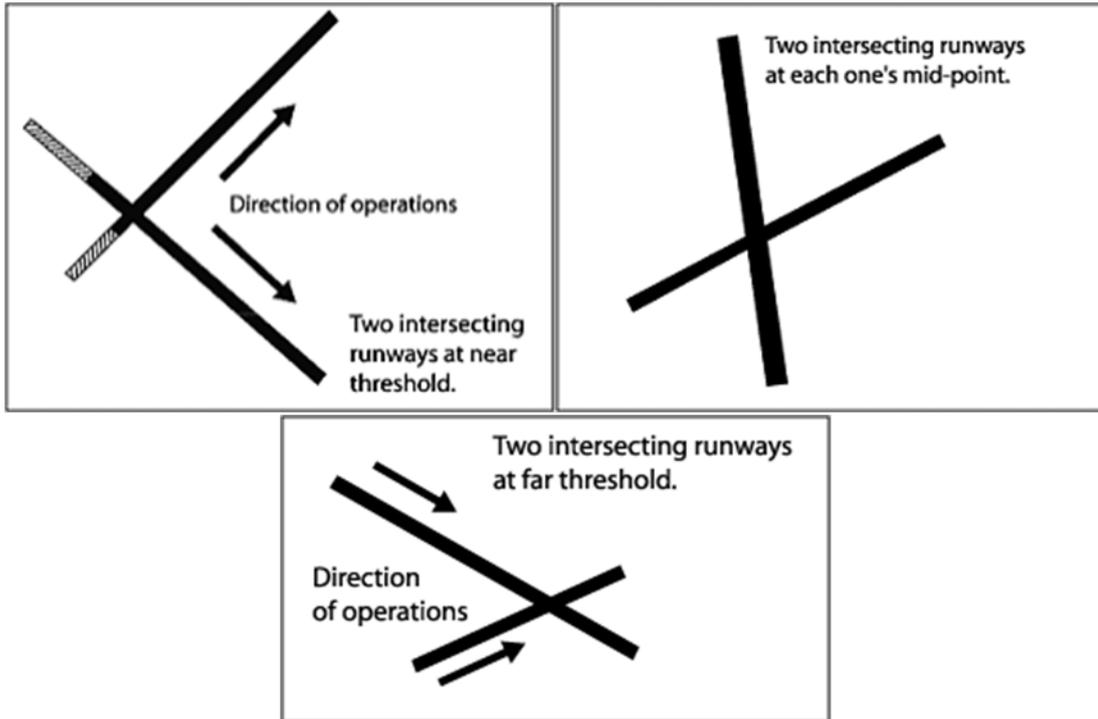
Figura 2.7: Tipos de *Runways* em V-aberto



2.1.4.1.4 *Runways* que se interceptam São designadas desta forma a configuração de pistas que apresentem duas ou mais *runways* que se interceptam nalgum ponto. É uma boa configuração a adoptar em locais onde não existe prevalência de ventos em apenas numa direcção ao longo do ano. Desta forma, tendo várias direcções disponíveis é aumentada a probabilidade de ter pelo menos uma das *runways* disponíveis para proceder às aterragens e descolagens das aeronaves. Na melhor das hipóteses, em alturas em que o vento é bastante forte ou outras condições atmosféricas extremas não se apresentem é possível, com esta configuração, usar diversas pistas em simultâneo (claro está que é preciso garantir que não haverá colisões entre aeronaves no local onde as pistas de interceptam).

Relativamente a esta configuração existem três possibilidades do local onde a intercepção das pistas pode ser feita, tendo por referência a direcção das aterragens e descolagens, e são: no início da pista; a meio de ambas ou na extremidade final (ver Figura 2.8). No caso em que as pistas são interceptadas no início da pista a taxa de aterragens e descolagens que podem ser feitas desta forma é a maior, a segunda configuração com maior taxa é quando as intercessões são a meio das pistas e por fim quando são no final.

Figura 2.8: Tipos de *Runways* que se Interceptam



2.1.4.2 *Taxiway*

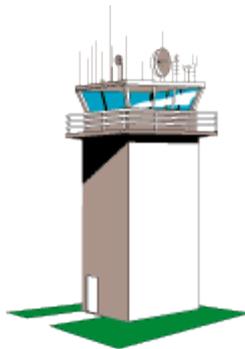
As *taxiways* são superfícies utilizadas pelas aeronaves para se deslocarem de um local para outro dentro da área de um aeroporto e que fazem normalmente a ligação entre as *runways*, hangares e terminais de um aeroporto. Para diferenciar as *runways* das *taxiways*, estas últimas são identificadas por letras ao contrário das *runways* que se fazia a identificação por números. Como as *taxiways* são usadas para efectuar deslocamentos não se torna necessário haver uma diferenciação de qual o sentido em que se está a percorrer a *taxiway*, desta forma não se torna necessário atribuir letras diferentes à mesma *taxiway* dependendo do sentido em que se está a percorrer a mesma (ao contrário do que esta feito nas *runways*). Nos casos em que existem demasiadas *taxiways*, em aeroporto demasiado grandes, muito facilmente se esgotam as letras possíveis para as identificar, nestes casos as letras são complementadas com números, não existindo no entanto uma regra específica para a sua numeração [7].

2.1.4.3 Torre de Controlo

Control Tower (ATCT - Air Traffic Control Tower), ou torre de controlo, é o edifício responsável por providenciar segurança, ordem e fluidez no tráfego das aeronaves num

aeroporto e nas suas imediações[8]. Estas torres são facilmente identificadas em qualquer aeroporto pela sua estrutura bastante habitual: edifício alto com janelas a toda a volta perto do topo e ainda com diversas antenas sobre o edifício (ver Figura 2.9). Uma particularidade sobre os vidros destes edifícios é que se encontram sempre ligeiramente inclinados para fora, sendo a razão prevenir que os controladores sejam afectados por reflexos do seu equipamento nos vidros, associado com isto o tecto é normalmente de cor escura (preta). Algumas características adicionais serão apresentadas na secção 2.2.1.4, mais à frente.

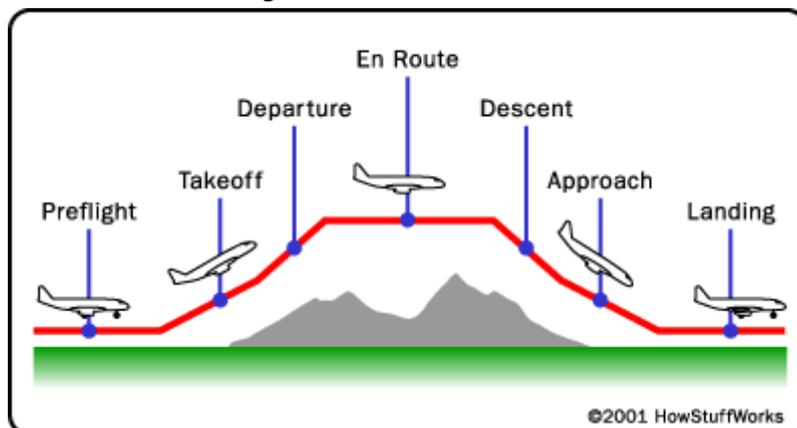
Figura 2.9: Imagem Típica de uma Torre de Controlo



2.1.5 Fases do voo

Na Figura 2.10 é possível ver, de uma forma esquematizada, a sequência de estados de um voo.

Figura 2.10: Fases de um Voo



De seguida encontra-se uma breve descrição de cada uma destas fases apresentadas, quando o voo é executado em situações consideradas normais [8]:

- **Preflight** - Compreende todos os procedimentos e protocolos de segurança que têm de ser efectuados antes do voo, habitualmente através de check lists. Desta fase faz também parte a deslocação da aeronave desde a porta de embarque até à pista. Durante estas operações são trocadas também mensagens com os controladores da área terrestre do aeroporto.
- **Takeoff** - Após autorização, por parte do ATCO, o piloto da aeronave aumenta a potência da mesma e percorre a pista de lançamento até ter velocidade suficiente para levantar voo.
- **Departure** - Fase de ascensão da aeronave até à sua altitude cruzeiro.
- **En route** - Deslocação em altitude cruzeiro, podendo passar vários espaços aéreos diferentes. Sempre que é feita uma transição de espaço aéreo é também alterado o controlador responsável pela aeronave. Fase mais ou menos demorada conforme a distância entre o aeroporto de partida e o de chegada.
- **Descent** - Descida da aeronave da altitude cruzeiro e preparação para efectuar a aproximação ao aeroporto.
- **Approach** - Aproximação da aeronave à pista de aterragem. As indicações necessárias para a aterragem da aeronave são fornecidas pelo ATCO. Esta fase apenas é iniciada após permissão do controlador da torre de controlo do aeroporto, indicando que a pista de aterragem está livre.
- **Landing** - Após o contacto da aeronave com o solo, esta é encaminhada para a porta de desembarque.

2.1.6 Corredores de circulação

Com o objectivo de manter o fluxo de tráfego aéreo mais correcto, simples e seguro, desde há vários anos que foi adoptado o conceito de corredores aéreos (airways). Estes corredores são espaços definidos pelos quais as aeronaves circulam dentro do espaço aéreo (Figura 2.11). Trata-se de um conceito com algumas semelhanças a uma auto-estrada normal (rodoviária). No entanto, como é óbvio, no céu não podemos ter fisicamente limites traçados como o que é possível e existe em terra, no entanto com o auxílio de cartas é possível fazer uma equivalência. A utilização prática destes corredores aéreos ajuda no trabalho dos ATCOs pois as deslocações já estão, na sua maioria definidas, sendo praticamente apenas necessário monitorizar cada um dos corredores aéreos existentes. Dentro de cada corredor de circulação todas as regras de segurança sobre as distâncias de aeronaves continuam a existir. Utilizando outra analogia com o tráfego rodoviário, a distância que deve ser assegurada entre dois veículos que circulam no mesmo sentido de uma auto-estrada, tem o mesmo objectivo de evitar acidentes e colisões [9].

Controlo de Tráfego Aéreo

Figura 2.11: Esquema de Corredores de Circulação Aérea



2.2 Modelo de ATC actuais

Actualmente não existe nenhum centro ou entidade mundial responsável por fazer toda a gestão do tráfego aéreo que existe no mundo ou que estipule exactamente uma forma de funcionamento do controlo de tráfego. A forma como é feito o controlo de tráfego aéreo varia de zona para zona apresentando algumas semelhanças mas também algumas diferenças. Neste capítulo serão apresentados os modelos de ATC referentes aos Estados Unidos e à Europa.

2.2.1 Modelo Americano

Nos Estados Unidos existe uma entidade que tem grande responsabilidade sobre a segurança aérea civil, a FAA (Federal Aviation Administration - Administração Federal de Aviação). Os principais objectivos desta entidade são [10]:

- Regulação da aviação civil para o aumento da segurança;
- Incentivar e apoiar no desenvolvimento de novas tecnologias para a aeronáutica civil;
- Desenvolver e operar com um sistema de ATC e navegação para aeronaves quer militares quer civis;
- Pesquisa e desenvolvimento de um Sistema Nacional do Espaço Aéreo e aeronáutica civil;
- Desenvolver e realizar acções de controlo dos efeitos causados pela aviação civil, desde o ruído até outros impactos ambientais resultantes;
- Regular toda a rede de transporte aérea comercial nos Estados Unidos.

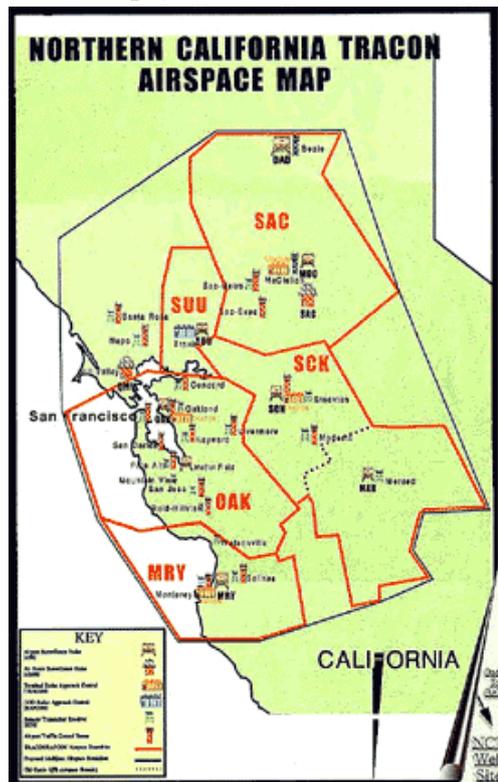
2.2.1.1 TRACON

Existem espalhados pelos Estados Unidos diversas instalações/edifícios com equipamentos que permitem a monitorização do tráfego aéreo através de radares e que permitem aos ATCOs darem assistência às aeronaves nas diferentes fases de voo: partidas, descidas e aproximações à pista. Outra função destes centros é garantir que em qualquer uma das fases de voo das aeronaves, estas estejam sempre a uma distância segura das outras aeronaves que também circulam no mesmo espaço aéreo. Estes edifícios são chamados de TRACON (Terminal Radar Approach Control) [8].

Cada TRACON pode fazer a gestão do tráfego aéreo em diferentes aeroportos que estejam contidos no seu sector. O espaço aéreo associado a cada TRACON varia consoante a localização do mesmo, do tamanho e do número de aeroportos por ele abrangido. Nos

Estados Unidos existem mais de 150 TRACONs e na maioria encontra-se em edifícios totalmente independentes e separados de qualquer aeroporto. Cada espaço que é observado pelo TRACON é subdividido em áreas mais pequenas (sectores), como se pode observar pela Figura 2.12.

Figura 2.12: Espaço TRACON da Califórnia do Norte



Internamente a cada sector do TRACON estão associados diversos controladores, responsáveis por assistir os pilotos quando pretendem sair da fase de “em rota” para a fase de “descida”. Existem quatro tipos diferentes de controladores dentro de cada TRACON com responsabilidades distintas: grande altitude, baixa altitude, aproximação e *feeder*. Estes controladores vão passando informação entre si começando, neste processo, pelo controlador responsável pelas aeronaves a efectuar a descida que ainda estejam a uma grande altitude, passando o serviço para o controlador de baixa altitude e a seguir para o de aproximação. O controlador de aproximação analisa todas as aeronaves que se deslocam para o mesmo aeroporto e ordena-os e encaminha-os para o aeroporto mantendo sempre a distância de segurança entre as aeronaves. Quando a aeronave fica aproximadamente a 50 milhas (80 Km) do limite do aeroporto de destino, o controlador responsável pela aeronave volta a alterar passando agora para o último desta sequência, o *feeder controller*. Por fim quando a aeronave entra no espaço aéreo do aeroporto, esta deixa de ser controlada pelo TRACON passando a responsabilidade para a torre de controlo do próprio aeroporto.

pés (perto de 304 metros) se a aeronave estiver abaixo dos 29000 pés (perto de 8840 metros). Se a aeronave estiver acima de 29000 pés o espaçamento entre aeronaves deverá ser, na vertical, de 2000 pés (perto de 610 metros).

Dependendo da quantidade de tráfego e do tamanho pelo qual o ARTCC é responsável, o seu espaço de monitorização é subdividido em sectores mais pequenos. Com esta divisão torna-se mais fácil para os controladores do centro terem um maior e melhor controlo sobre cada sector e assim aumentando a sua eficácia. Nestes postos de trabalho são diferenciadas três categorias de controladores: radar, associado e ajudante. O controlador responsável pelo sector é o do radar, ficando ao seu cuidado manter as distâncias de segurança entre todas as aeronaves presentes no seu sector. Todas as comunicações entre a aeronave e o centro passam por este controlador. As comunicações e toda a coordenação que é feita com os outros sectores adjacentes são partilhadas entre os controladores de radar e associado. Como o próprio nome indica o controlador associado assiste o de radar, recebe e trata a informação dos planos de voo das aeronaves mesmo antes de estas entrarem na zona afectada por este centro (entre 5 e 30 minutos antes da aeronave entrar no sector). O planeamento das instruções a serem dadas às aeronaves para que estas se mantenham afastadas com a distância de segurança entre si é feito por este controlador assistente, tirando partido das informações recebidas dos outros sectores adjacentes. Existe ainda o terceiro tipo de controlador, o ajudante, que entra em acção principalmente quando o tráfego existente no sector é bastante elevado. Este controlador tanto pode auxiliar o controlador de radar a garantir que todas as aeronaves se encontram afastadas o suficiente das outras ou então a ajudar o controlador associado nas comunicações externas com os outros sectores. Esta ajuda extra ajuda a manter o fluxo eficiente do tráfego no seu sector.

2.2.1.3 ATCSCC

Air Traffic Control System Command Center (ATCSCC) é o regulador do tráfego aéreo responsável quando as condições atmosféricas são adversas, quando equipamento nalgum centro de controlo não esteja totalmente operacional, *runways* estejam desactivadas por algum motivo ou noutra situação que aumente a dificuldade na gestão do tráfego aéreo. Apenas existe um centro deste tipo, localizado na sede da FAA em Washington. Sempre que é necessário este centro tomar controlo das operações (nas condições acima indicadas), vários especialistas entram em funções para tentar minimizar o impacto que a situação impõe, tentando manter um fluxo normal e seguro do tráfego. Neste processo, juntamente com estes especialistas que se encontram no ATCSCC, é estabelecida uma colaboração com os funcionários da(s) companhia(s) aérea(s) e todos os controladores que se encontrem nalgum centro afectado pelas razões da entrada do ATCSCC em acção [8].

2.2.1.4 ATCT

Como já foi dito as torres de controlo (ATCT - Air Traffic Control Tower) são edifícios posicionados nos aeroportos que permitem fazer uma melhor gestão do tráfego. Em cada torre de controlo existem várias funções e os controladores estão divididos por quatro categorias: dados de voo (*flight data*), ordens de permissão (*clearance*), terreno (*ground*) e local. Segue-se uma breve descrição de cada uma destas categorias [8].

2.2.1.4.1 Controlador de dados de voo (Flight Data Controller) Este controlador é o responsável por comunicar alguma informação que seja relevante para o piloto sobre a descolagem e de confirmar toda a informação sobre o voo. Em casos em que a visibilidade não é boa e a descolagem tem de ser feita baseada nos instrumentos de voo é este controlador que fica responsável por fornecer permissão para levantar voo.

2.2.1.4.2 Controlador de ordens de liberação (Clearance Delivery Controller) Este é o responsável por conceder as permissões para a partida dos voos, verificando se todas as condições para a partida da aeronave estão garantidas para que seja feita em segurança. Para estas permissões é facultada a seguinte informação:

- Identificação da aeronave;
- Validade da ordem;
- Procedimento de partida;
- Rota do voo;
- Altitude atribuída;
- Frequência (rádio) da partida;
- Código pelo qual é reconhecido pelo ATC.

2.2.1.4.3 Controlador de terreno (Ground Controller) Este controlador é o responsável por todo o movimento que é feito pelas aeronaves enquanto se deslocam nas *taxiways* e por qualquer veículo que circule quer em *taxiways* quer em *runways* que se encontrem inactivas. Uma das principais e mais importantes funções deste controlador é assegurar que não existem passagens, de nenhum tipo de veículo ou aeronave não autorizada, por *runways* que estejam activas. Outra função é supervisionar e garantir que zonas próximas das *runways* activas (“critical areas”) estejam sempre desimpedidas quando uma aeronave faz a descolagem ou aterragem.

2.2.1.4.4 Controlador Local (Local Controller) Dois objectivos fundamentais são inteiramente da responsabilidade deste controlador. Uma é garantir a distância de segurança entre a chegada e partida das aeronaves ao aeroporto. O outro objectivo é garantir a sequência segura das chegadas e partidas, quer para evitar colisões quer para garantir as condições de segurança necessárias para as aeronaves. Por exemplo, sempre que uma aeronave levanta voo há deslocamentos de ar e é portanto necessário garantir que essa deslocamento de ar seja estabilizada, antes de qualquer aeronave poder aterrar ou levantar voo pela mesma *runway*.

Existem algumas regras que têm de ser respeitadas para conceder partidas ou chegadas e às quais este controlador tem de as verificar continuamente para conceder ou recusar ordens de aterragem ou para levantar voo. Uma regra obriga a que uma aeronave só possa aterrar se a *runway* que lhe foi atribuída possui pelo menos uma *taxiway* livre associada. Outra regra indica que pode ser dada permissão de descolagem se a aeronave que anteriormente usou essa pista já se encontra no ar e não existe nada a obstruir a pista ou a atravessá-la. Outras restrições se impõem quando se trata de aeronaves de categorias diferentes e que têm que se ter em conta as prioridades de cada uma das categorias.

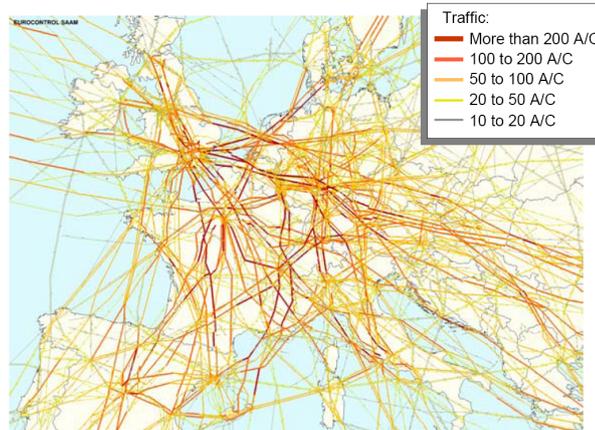
2.2.2 Modelo Europeu

Actualmente o controlo do tráfego aéreo sobre a Europa encontra-se fragmentado em trinta e seis diferentes fornecedores de serviços de navegação assim como procedimentos operacionais. Em geral o ATC é feito a nível nacional em vez de internacional, que leva a um grau de ineficiência não desejável para a aviação assim como a custos superiores. Os métodos de cada país podem então sofrer algumas modificações mas em geral e na maioria dos casos segue uma estrutura idêntica à utilizada nos Estados Unidos e apresentada no subcapítulo anterior (3.1).

Existem no entanto iniciativas de tornar o controlo de tráfego aéreo na Europa mais homogéneo e eficiente. Duas iniciativas de grande dimensão e que terão grande impacto sobre a forma como é feita a gestão do tráfego aéreo são a de criar um espaço aéreo único sobre a Europa (SESAR [11] - Single European Sky ATM Research, que se encontra ainda numa fase inicial) e o de, na parte mais central da Europa, criar um centro de gestão do tráfego aéreo para ser mais eficaz (FABEC [12] - Functional Airspace Block Europe Central). FABEC abrange dez espaços aéreos (Bremen, Langen, Munique, Amesterdão, Bruxelas, Paris, Reims, Marselha, Bordéus, Brest) pertencentes a seis países (Bélgica, França, Alemanha, Luxemburgo, Holanda e Suíça) e situa-se praticamente no centro da Europa. Este é considerado o local com maior densidade de tráfego sobre a Europa, como apresentado na Figura 2.14.

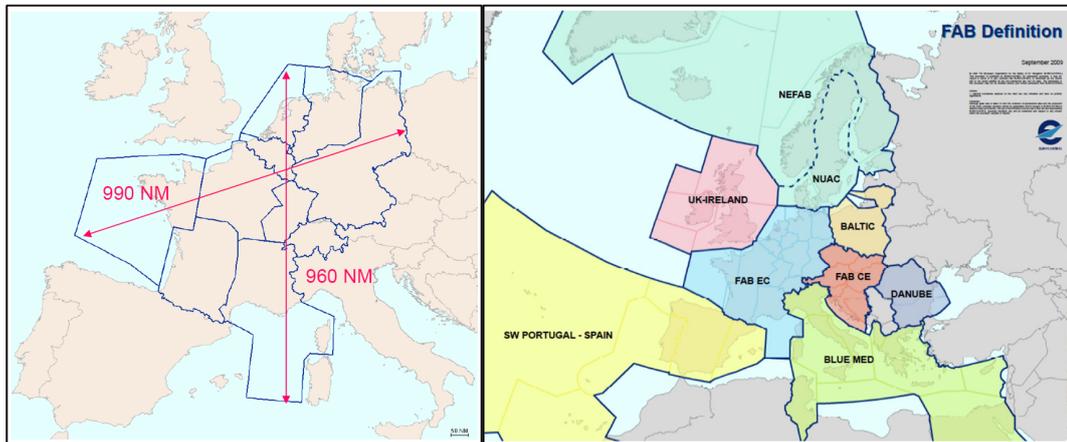
Controlo de Tráfego Aéreo

Figura 2.14: Densidade do Tráfego Aéreo sobre a Europa



Por este facto pretende-se então, que ao criar um controlo mais centralizado, toda a gestão do tráfego aéreo seja mais eficiente, podendo, de certa forma, prever com maior antecedência os percursos de voo das aeronaves e assim diminuir os conflitos. A proposta apresentada (FABEC) é apresentada na Figura 2.15 a), com a indicação da sua dimensão apresentada em milhas náuticas. A Figura 2.15 b) apresenta outras iniciativas paralelas ao FABEC com o objectivo de homogeneizar todo o ATC europeu.

Figura 2.15: Proposta de Centro de Controlo Europeu a) Proposta FABEC (Esquerda) b) Outras FABs na Europa (Direita)



Capítulo 3

Tecnologias e Sistemas de ATM

Neste capítulo será apresentado o estado da arte sobre as tecnologias e sistemas já desenvolvidos sobre a gestão do tráfego aéreo e simulação do controlo de tráfego aéreo.

Vários sistemas já se encontram em utilização nos aeroportos que facilitam o trabalho aos controladores de tráfego aéreo. Outros sistemas, de simulação, são utilizados para treino de novos controladores de tráfego e usados pelas empresas que fazem cursos de formação. Existe ainda outros sistemas que têm como principal objectivo a recolha, tratamento e processamento de toda a informação que rodeia o ATC. De seguida serão descritos alguns destes sistemas ou empresas que fornecem algumas destas soluções para ATC [13]:

3.1 ACAMS

Um sistema que providencia um conjunto de soluções para monitorizações e controlo de requisitos básicos para uma torre de controlo de tráfego aéreo é o ACAMS, desenvolvido na Noruega, e que já se encontra em utilização em diversos aeroportos desde 1999. A sua estrutura interna, de forma modular, permite que seja mais facilmente ajustado a cada aeroporto, seja este de uso comercial ou militar, dependendo das suas características.

O sistema ACAMS possui, como forma de interacção com os controladores de tráfego aéreo, dois LCDs touch-screen que dão acesso aos controladores a todas as funcionalidades que necessita de uma forma intuitiva. A informação apresentada nos ecrãs (por exemplo a direcção do vento, velocidade, posição das aeronaves) pode ser navegada através de acções sobre o ecrã ou com a utilização de um rato e teclado.

Por a arquitectura ser modular é possível também que o controlador personalize o ecrã da forma que se sentir mais confortável, como por exemplo escolher quais as janelas de informação é que pretende visualizar e em que posição no ecrã, que acções pretende que estejam sempre visíveis, etc.

A estrutura utilizada pelo ACAMS baseia-se num sistema com vários componentes do tipo cliente / servidor. Estes componentes encontram-se interligados através de uma rede Ethernet dupla, fornecendo desta forma uma arquitectura mais tolerante a falhas. No entanto desde a implementação deste sistema em diferentes aeroportos não houve registo de falhas ocorridas.

3.2 NAV CANADA

NAV CANADA é a empresa proprietária e operadora do sistema civil de navegação aérea do Canadá. Esta empresa fornece serviços de apoio à navegação a mais de onze milhões de aeronaves anualmente, de uma forma segura, eficiente e económica.

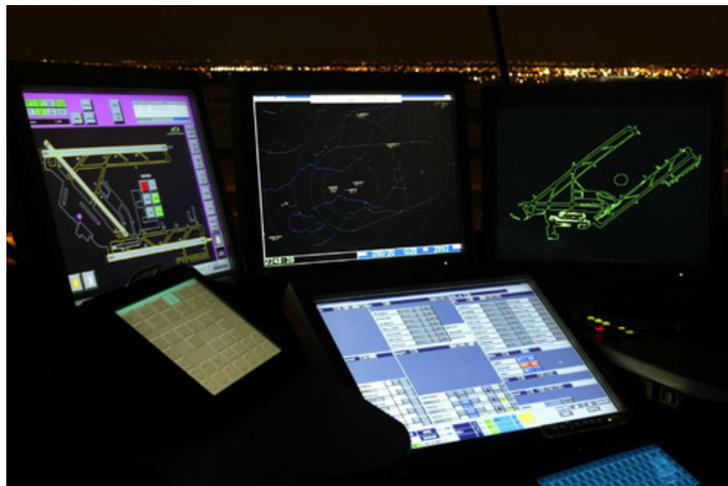
O seu sistema principal, EXCDS (Extended Computer Display System), é o responsável pela troca de dados entre a torre de controlo, terminal, aeroporto e aeronaves em rota e permite aos controladores de tráfego aéreo fazerem uma gestão dos dados de voo de uma forma electrónica, com recurso a ecrãs tácteis. Um dos pontos fortes deste sistema é a capacidade das transferências de dados de uma forma bastante eficiente assim como permitir uma fácil personalização do sistema de modo a ir ao encontro dos requisitos operacionais de cada local onde o sistema é aplicado.

EXCDS encontra-se implementado em vinte e cinco instalações da NAV CANADA assim como além fronteiras nos aeroportos de Stansted e Gatwick no Reino Unido e a ser implementado em Heathrow.

O Sistema de Monitorização da Performance de Aeroportos da NAV CANADA tem por base uma aplicação Web para apoio à decisão quer aos operadores dos aeroportos assim como as diversas companhias aéreas. A informação que é apresentada é derivada do EXCDS e de fornecedores em tempo real de informações, tais como partidas e chegadas, monitor com os diversos movimentos no aeroporto, tráfego nas *runways* e ainda histórico de movimentos das aeronaves.

A Figura 3.1 mostra um posto de trabalho que usa o sistema da NAV CANADA com diversos monitores tácteis onde são apresentadas todas as informações relevantes para o controlador.

Figura 3.1: Sistema EXCDS



Uma outra ferramenta bastante poderosa desta mesma empresa é o SASS (Scheduling And Sequencing System). SASS é um sistema que permite estabelecer uma sequência das aterragens dos aviões no aeroporto e fazer uma atribuição dos locais de embarque respectivos a cada aeronave. Permite ainda contemplar atrasos neste planeamento, criando cenários alternativos ou indicando soluções secundárias para o escalonamento. Internamente o SASS foi concebido para maximizar a eficiência do espaço de um aeroporto e minimizar os aumentos de tempo necessários adicionar devido a atrasos de aeronaves. Com este sistema é possível, para o aeroporto e companhias aéreas, obter mais lucros pois sendo os horários cada vez mais correctos e o impacto dos atrasos diminuído não se torna necessário fazer tantos pagamentos de indemnizações referentes a atrasos de viagens. Estas vantagens na sua utilização com a forma da sua arquitectura conseguiram fazer com que este fosse um sistema robusto, flexível e portátil que pode ser facilmente adoptado por qualquer aeroporto independentemente das infra-estruturas que possuir.

3.3 BAE Systems

Um outro tipo de aplicação, mais orientado para a simulação e treino para controladores de tráfego aéreo, é o produto DATS (Durable Aviation Trainer Solutions), desenvolvido pela BAE Systems. Este sistema abrange diversos níveis de complexidade desde os conceitos teóricos mais básicos do ATC até exercícios que contêm bastante complexidade.

Dentro da plataforma DATS existem alguns subsistemas, tais como “DATS ATC Radar Simulator” (Figura 3.2, a)) que engloba o espaço aéreo confinado ao controlador assim como as aterragens. Outro subsistema é o “DATS ATC Tower Simulator” (Figura 3.2 b))

que é responsável pela simulação dos movimentos em terra, referentes ao aeroporto em questão.

Figura 3.2: Exemplo do Sistema DATS a) Simulador de Radar (Esquerda) b) Simulador de ATCT (Direita)



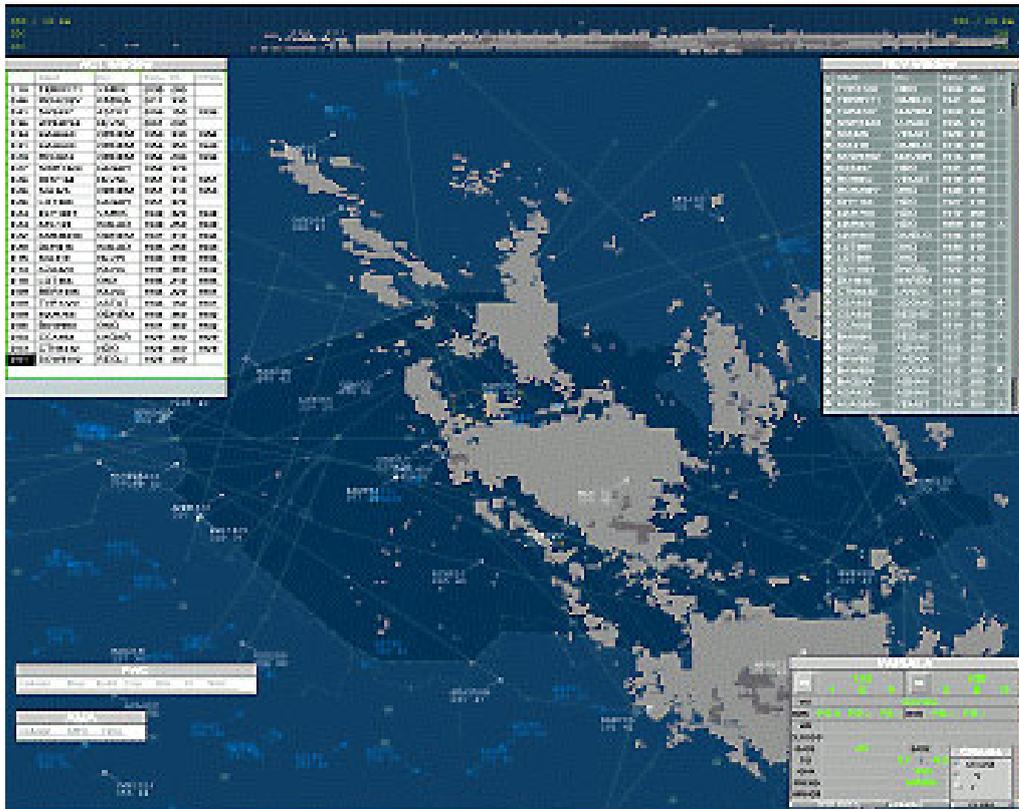
Qualquer um destes subsistemas tem a possibilidade de ser integrado com o hardware existente em cada um dos locais de aplicação ou se preferível, estes ambientes, podem ser emulados pelo próprio sistema. No caso de o hardware ser simulado é ainda possível fazer configurações e interagir com o “hardware” como se ele existisse na realidade (fisicamente).

3.4 Ifield Computer Consultancy

Mais orientado para a gestão de toda a informação que é recolhida pelos centros de controlo, existem também várias aplicações no mercado que fazem uma gestão eficiente dessa informação. Um desses casos é proveniente da Ifield Computer Consultancy com o produto ATRAK que faz o processamento de toda a informação recolhida para a gestão do tráfego aéreo e envia, de forma estruturada e organizada, a informação para os diferentes sistemas de ATC que apresentarão da melhor forma ao ACTOs.

ATRAK contém dois subsistemas diferentes para fins distintos. Um dos subsistemas é o ATRAK-IMS (Information Management System) para efeitos de planeamento do controlo de tráfego aéreo (Figura 3.3). Para as aplicações sobre as aterragens das aeronaves e diversas funções da torre de controlo de um aeroporto, este sistema faculta informação referente às partidas / chegadas, dados atmosféricos, controlo sobre tráfego local, uso das *runways*, luzes, entre outra informação relevante. Para controlo da zona de cada aeroporto são fornecidas informações sobre o estado do tempo, horas do nascer do sol e do pôr-do-sol (entre outras) e ainda a possibilidade de consultar centros militares nas redondezas, espaços aéreos proibidos ou áreas restritas.

Figura 3.4: Subsistema ATRAK-BYPASS / PC SYSTEM



3.5 Tern Systems

Tern Systems é uma empresa que teve origem nos finais dos anos setenta através de uma cooperação entre a Administração de Aviação Civil da Islândia e a Universidade local. Tem desenvolvido desde então sistemas de auxílio ao ATC. Destacam-se dois sistemas, TAS e TSIM.

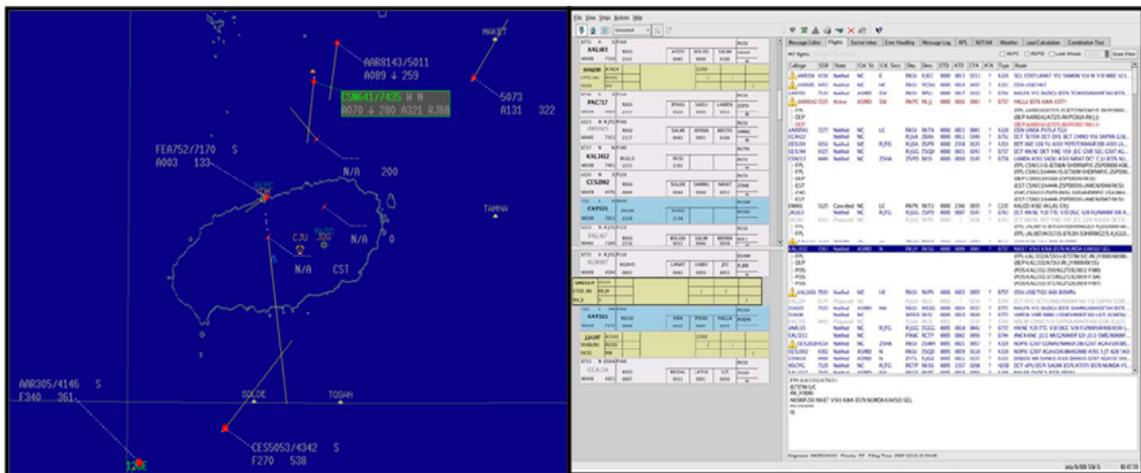
TAS (Tern ATC Automation Systems) é um sistema modular que combina monitorização e processamento de dados relacionados com voos de uma forma avançada e com interface intuitiva para os utilizadores. Possui dois modos de controlo, tático e estratégico, e ainda possui capacidades de detecção e resolução de conflitos. Este sistema pode ser implementado em diversos centros de controlo com responsabilidades na supervisão distintas: “em rota”, aproximação e a partir de torres de controlo.

Internamente é estabelecida uma interligação entre o processamento dos dados de voo e o processamento de monitorização. Para o primeiro é constantemente actualizado com as informações introduzidas manualmente pelos controladores ou recebidas pelo sistema de monitorização. Quando este não se encontra operacional são feitas estimativas para compensar essa falha. Referente ao sistema de monitorização este dedica-se à análise

de todos os dados obtidos, por exemplo, pelos diversos radares (primário e secundário) interligando toda essa informação.

Referente à interface com o utilizador foram respeitadas as recomendações feitas por parte do EUROCONTROL (visto tratar-se de um sistema desenvolvido na e para a Europa) e ainda apresentar sempre que seja necessário alertas localizados da situação. Este sistema, como dito anteriormente, pode ser usado com toda a informação em formato digital ou parte em papel. Na Figura 3.5 a), é apresentada uma imagem da interface usada para a monitorização do espaço aéreo abrangido pelo controlador e na Figura 3.5 b), é apresentada uma janela contendo a informação os dados de todos os voos.

Figura 3.5: Interfaces disponibilizadas pelo Sistema TAS a) Monitorização do Espaço Aéreo (Esquerda) b) Informação dos voos (Direita)



TSIM (Tern ATC Training Simulators) providencia ambientes de treino o bastante realistas para postos de controlo em diversos centros, desde torres de controlo num aeroporto e na zona de aproximação até controladores que façam a gestão das aeronaves “em rota”. Através de configurações é possível apenas apresentar uma consola com dados referentes a um centro de controlo como apresentar múltiplas consolas de vários radares em simultâneo. O comportamento das aeronaves no simulador de radar está desenvolvido de uma maneira que se aproxime o mais possível do que acontece na vida real ou mesmo causar um aumento intencional para tornar mais complexos os exercícios. A utilização de potentes editores de rotas permite ao controlador um treino mais intensivo ou a pesquisa e desenvolvimento de novos procedimentos no controlo de tráfego.

Para tornar o ambiente mais realista e envolvente, para o caso do controlador numa torre de controlo, este sistema possui uma interface em 3D que permite dar a sensação do controlador estar fisicamente presente numa torre de controlo (Figura 3.6).

Figura 3.6: Utilização do TSIM para treinos de ATCOs em Torres de Controlo



Este simulador dispõe ainda de sistemas auxiliares, capazes de gerar atrasos ou erros em mensagens ou informações, capazes de permitir usar pseudo-pilotos e efectuar acções sobre estes e ainda sistemas capazes de simular interacção entre pseudo-pilotos e o controlador que está a utilizar o simulador. Este último sistema pode ser utilizado independentemente do simulador como uma versão standalone de sistema de comunicação por voz.

3.6 NITA

NITA actualmente é uma empresa Russa reconhecida por trabalho desenvolvido na área do desenvolvimento e produção de equipamento e software relacionado com a aviação. Entre os seus principais objectivos destacam-se os sistemas de ATC para centros de aproximação, “em rota” e torres de controlo; processamento de dados de voo para o ATC; simuladores de voo e simuladores de torres de controlo a 3D.

O principal produto relacionado com os sistemas de ATC é o ALPHA. Este sistema é indicado para centros de controlo com intensidade de tráfego média e alta. É capaz de receber, processar e apresentar dados referentes a condições atmosféricas, dados aeronáuticos e ainda automatizar análises e procedimentos de ATC.

Outras aplicações foram também desenvolvidas das quais se destacam as seguintes. PLANETA, um processador de dados de voo que analisa constantemente toda a informação proveniente de dados obtidos por outros sistemas. LADOGA é um sistema de transmissão de dados com o objectivo de receber, processar e transmitir informação de radares ou radiotransmissores em comunicações entre centros de controlo. Para efeitos de simulação existe o EXPERT, que foi desenvolvido para treinos iniciais e desenvolvimento

de controladores de ATC. Está desenvolvido sobre uma forma modular e permite ser aplicado sobre controladores de radar ou em controladores em torres de controlo, neste último caso é possível adicionar o efeito visual de se estar dentro da torre de controlo, através de monitores (conforme o nível de tecnologia associado o ambiente pode ser mais ou menos realista e sofisticado, Figura 3.7).

Figura 3.7: Possíveis Interfaces do Sistema EXPERT



3.7 SmartGlobe

Indirectamente ligado à gestão de tráfego aéreo, esta é uma aplicação que se torna bastante útil na criação de novas cartas para a navegação aérea. Com esta aplicação é possível introduzir informação referente à topografia e hidrografia que seja relevante para o local em questão. Facilita na introdução de informação referente a procedimentos, que sejam necessários adoptar ou apenas sugestões, sobre as cartas de uma forma intuitiva. Permite fazer conversões de cartas, que actualmente apenas existam em suporte papel, imagem digital ou outro para informação digital que pode ser trabalhado através do SmartGlobe. Uma outra funcionalidade desta aplicação é a possibilidade de poderem ser criadas cartas totalmente novas a partir do zero através de dados presentes em base de dados.

Capítulo 4

ATC baseado em agentes

Várias ideias têm sido discutidas sobre a melhor forma de introduzir agentes no ATC com vista a melhorar o desempenho dos ATCOs. Neste capítulo serão apresentadas algumas propostas avançadas e estudos elaborados sobre este tema.

4.1 Agentes inteligentes no ATC

Um estudo alargado sobre agentes que funcionam como ATCOs foi desenvolvido por Callantine [14] em que cada agente é responsável por controlar apenas um único sector em cada momento. O estudo baseou-se em três propósitos diferentes. O primeiro foi a procura de uma estrutura de agentes capaz de controlar sistemas complexos de ATC. Nomeadamente na capacidade de agentes planearem e responderem a situações num ambiente dinâmico, onde capacidades de percepção e de tomadas de decisão tomam um papel bastante importante. São analisados métodos que usam regras heurísticas e métodos focados na optimização. Desta forma um dos objectivos é desenvolver agentes inteligentes que forneçam uma aproximação do comportamento de um controlador de tráfego aéreo humano.

O segundo propósito foi a continuação de um trabalho já desenvolvido anteriormente em que foi utilizado o Crew Activity Tracking System (CATS) já no ano de 1999. Neste sistema para executar uma acção são consultadas “bibliotecas de habilidade” e “regras de controlo”, onde são reconhecidos padrões e tomadas decisões sobre a acção a ser executada. Por fim, um último incentivo para este estudo efectuado tem por base a pesquisa de novos agentes inteligentes que ajudem no estudo de novos métodos e conceitos no controlo de tráfego aéreo.

Uma conclusão apresentada no final deste estudo indica que o método apresentado e utilizado para o efeito [14] apresenta um bom desempenho dos agentes em sectores de grandes altitudes onde o principal objectivo é evitar colisões enquanto que nos sectores mais próximos da zona de descida e aterragem são rapidamente sobrecarregados

com as inúmeras operações que têm de ser efectuadas. No entanto o desempenho geral dos agentes na gestão do tráfego é razoavelmente bom, podendo ainda, na questão das prioridades, ser melhorada.

4.2 Agentes nas torres de controlo (ATCT)

Com os principais objectivos de detectar e evitar colisões e ainda fazer o processamento de aterragens de aeronaves num aeroporto, Henry Hexmoor e Tim Heng [15] apresentam algumas ideias para o cumprimento desses mesmos objectivos. Em cada momento os agentes, que desempenham funções representativas de ATCOs que se encontram numa torre de controlo de um aeroporto (ATCT), conhecem várias informações relativas a cada aeronave que sobrevoa o seu espaço aéreo: (a) localização da aeronave, considerando a origem do referencial $(x;y;z) = (0;0;0)$ como sendo a posição, no solo, da torre de controlo; (b) a direcção que está a tomar; (c) a sua velocidade; (d) se está a tomar acções de descida, subida ou de manter a altitude e ainda (e) a intenção de aterrar ou se está à espera de o fazer.

O agente da ATCT armazena três filas de aeronaves. Uma primeira fila diz respeito às aeronaves que fizeram pedidos de aterrar no aeroporto. Juntamente com cada pedido de aterragem é fornecido um nível de prioridade para o mesmo, por exemplo uma aeronave com pouco combustível terá uma prioridade mais elevada do que o normal. Esta fila é ordenada dependo da prioridade do voo, sendo as de maior prioridade as primeiras a serem atendidas. A segunda fila é respeitante às colisões e à qual fazem parte todas as aeronaves que estão em rota de colisão com outras aeronaves. Dependendo do nível de proximidade da colisão eminente é igualmente à fila anterior atribuído um valor de prioridade. Por fim uma terceira fila é usada para armazenar todas as aeronaves que apesar de terem efectuado o pedido de aterragem não o puderam fazer, por razões diversas e encontram-se actualmente num estado de espera. Sempre que há uma aterragem a fila das aeronaves que se encontram em estado de espera é consultada para verificar se alguma destas aeronaves já pode efectuar a aterragem.

4.3 Controlo do espaço envolvente das aeronaves

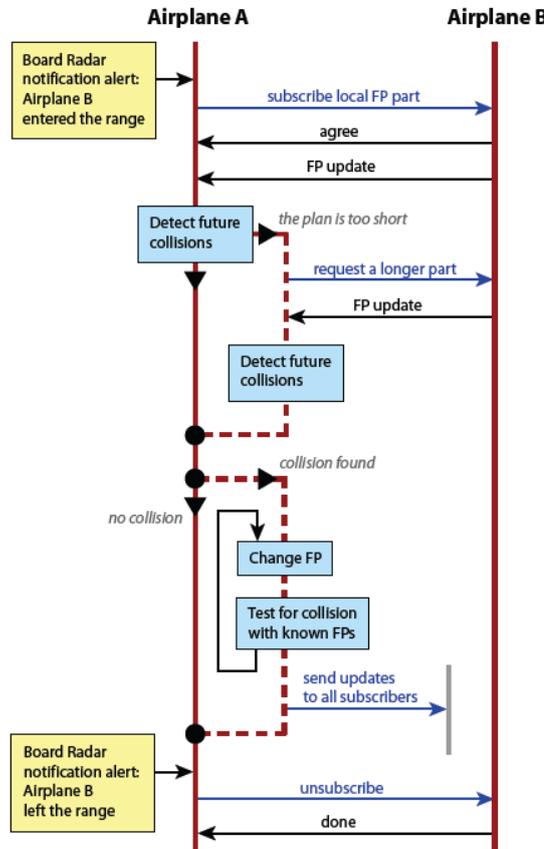
Um método de garantir que não existem colisões entre aeronaves é sugerido por Michal Pechoucek, David Sislak, Dusan Pavlicek e Miroslav Uller [16]. Nesta ideia apresentada os agentes são representativos das aeronaves.

O método consiste em delimitar quatro áreas/zonas à volta de cada aeronave: comunicação; alerta; segurança e colisão. A zona de comunicação é a mais externa e representa o alcance das comunicações a partir desta aeronave, isto é, apenas é necessário estabelecer comunicação directamente com outra aeronave se esta se encontrar dentro desta zona. A

zona de alerta corresponde ao alcance do radar da mesma. Se outra aeronave se encontrar dentro desta zona é iniciada uma troca de informações, nomeadamente indicação da posição relativa à outra aeronave e o seu plano de voo. A zona de segurança é respeitante a uma área onde não é permitido entrar outra aeronave, de modo a minimizar a mútua influência que os movimentos das aeronaves possam causar uma à outra, por exemplo a turbulência causada pela deslocação de ar de uma aeronave. No entanto é possível que aeronaves possam circular dentro da zona de segurança de outra, mas a sua rota pode ser afectada por turbulência. Esta restrição não se aplica quando é propositado que duas ou mais aeronaves voem numa formação em que é suposto circularem juntas. Por fim, a zona mais próxima da aeronave corresponde à zona de colisão. Quando a distância das aeronaves é inferior à soma do raio das duas zonas de colisão, torna-se inevitável a colisão entre ambas as aeronaves.

Ainda fazendo parte do método apresentado são consideradas dois cenários distintos, em que num existe a cooperação entre as aeronaves e outro em que essa cooperação não existe. No caso de existir cooperação uma proposta de negociação entre as aeronaves é apresentada sobre forma de um esquema na Figura 4.1, onde FP representa o plano de voo (Flight Plan). Se não houver cooperação entre ambas as aeronaves a aeronave toma por própria iniciativa alterar a sua rota para evitar a colisão, por exemplo no caso de haver avarias no equipamento de radar ou comunicação ou ainda quando a aeronave em causa apresenta comportamentos agressivos (por exemplo inimigo ou desviado).

Figura 4.1: Protocolo de Negociação Cooperativa



4.4 Distribuição dos agentes por sectores

Um outro método que permite interligar agentes inteligentes e o controlo de tráfego aéreo foi apresentado por Vladimi Gorodetsky [17], em que atribui operações, normalmente delegadas aos ATCOs, directamente às aeronaves que sobrevoam o espaço. Desta forma passam a ser as aeronaves que comunicam entre si e garantem um ordenado fluxo de tráfego e controlo para evitar colisões. De seguida é apresentada uma versão adaptada deste conceito de Gorodetsky em que as atribuições das tarefas são efectivamente atribuídas aos ATCOs.

Uma das ideias iniciais é dividir o espaço aéreo abrangido pelo aeroporto em dois tipos de sectores, para uma melhor e mais focalizada gestão do tráfego. Um dos tipos, central, fica responsável pelas ordens de aterragem e partida de aeronaves, sendo que apenas existirá um sector deste tipo. Os restantes sectores, periféricos, são responsáveis pela gestão dos corredores aéreos correspondentes assim como estabelecer pontos de entrada e saída com os sectores que lhe são adjacentes.

Os agentes que se encontram responsáveis pelos sectores periféricos são distribuídos por cada sector com um identificador S(ID-do-sector). Sempre que uma aeronave transita de sectores o agente responsável pela mesma altera, por exemplo, se uma aeronave está pronta a cruzar dois sectores, do S(A) para o S(B), o controlador responsável pela gestão do S(A) transmite essa informação para o S(B) que fica responsável a partir deste momento da monitorização desta aeronave.

4.4.1 Sectores periféricos

Cada sector está dividido em escalões de diferentes altitudes e possui diversos corredores de circulação. Uma aeronave pode transitar entre escalões, para fazer a aproximação à pista ou para sair da zona do aeroporto de partida, sempre que o escalão para onde se pretende deslocar se encontra livre. A monitorização de cada sector está dividida em duas fases. Numa primeira fase o agente responsável para permitir transições entre sectores tem de ter em conta dois importantes factores: a) uma determinada aeronave encontra-se num escalão diferente do que o esperado (por exemplo, num escalão com altitude superior quando se pretende fazer a aproximação à pista) e se não mudar de escalão pode ser necessário recalcular uma nova rota; b) numa mudança de escalão ficarem duas aeronaves a ocupar esse mesmo escalão que pode resultar em colisão.

A segunda fase de monitorização diz respeito ao cálculo das diversas mudanças de escalão por parte das aeronaves para um novo escalão que esteja livre. Neste cálculo são comparados vários parâmetros: classe da aeronave; altitude actual; altitude pretendida; tempo previsto para a transição para o novo escalão. Uma possível sequência de passos do agente presente neste sector é a seguinte:

- Ordenar as aeronaves por prioridade na mudança de escalão;
- Percorrer a lista de prioridades;
 - a) Verificar que o escalão de destino pretendido está vazio;
 - b) Se não estiver livre:
 - Verifica se pode aguardar no escalão actual e tenta alterar o escalão da aeronave que se encontra no escalão de destino;
 - Recalcula uma nova rota para a aeronave;
 - c) Se estiver livre;
 - Verifica todas as regras de segurança;

4.4.2 Transição entre sectores periféricos

Quando uma aeronave X presente no escalão com uma altitude H_x se aproxima dos limites de um sector A e pretende transitar para um sector B para prosseguir a sua rota

podem acontecer dois eventos distintos: a) transitar para o sector B e o agente responsável por esta aeronave altera; b) a aeronave fica a circular numa holding área (área de espera) até que seja possível transitar para o sector B. Para dar início ao processo de transição de aeronaves entre sectores existem duas situações diferentes em que pode acontecer: a) após uma aeronave se aproximar de um ponto de saída do sector A e pretender sair deste sector; b) a situação no sector B seja alterada. A sequência de decisões a serem tomadas num processo de transição de sectores, numa aeronave que efectue uma manobra de aproximação à pista é a seguinte:

- Calcular o conjunto de aeronaves no sector B onde a altitude é igual ou inferior à altitude da aeronave no sector A. Ou seja, calcular o conjunto C1 de aeronaves que respeita a seguinte condição: $C1 = \{Y \in B, H_y \leq H_x\}$;
- Calcular o conjunto C2 de aeronaves no sector A que pretendam passar para o sector B;
- Calcular o conjunto C3 de aeronaves no sector B que pretendam passar para o sector A;
- Verificar as seguintes restrições para poder fazer a transição entre sectores:
 - Garantir que existe pelo menos um lugar vago no conjunto C1 para mais uma aeronave;
 - Aeronave X não entra em conflito com nenhuma das aeronaves presentes em C1;
 - Aeronave tem a maior prioridade dentro do conjunto C2;
- Caso não consiga fazer a transição tentar fazer permutação entra alguma aeronave presente no conjunto C3.

4.4.3 Passagem para sector central

Uma aeronave só pode entrar no sector central com a permissão do agente responsável por este sector. Os agentes existentes nos sectores periféricos que fiquem adjacentes ao central comunicam qual a aeronave que pretende entrar neste sector fornecendo a classe da aeronave, distância da pista e corredor de circulação actual. Ao fornecer esta informação uma de duas acções pode acontecer: a) a aeronave tem permissões para entrar no sector central ou tem de ficar a aguardar no sector actual. Para a aeronave ter permissões para entrar no sector o agente central tem de garantir que as distâncias mínimas de segurança são respeitadas e verificar se não existe nenhuma partida programada que possa interferir com a aterragem desta nova aeronave que pretende fazer a aterragem no aeroporto. Um factor que também pesa na decisão do agente central é a prioridade das aeronaves, tempo

de espera, nível de combustível. Quando a aeronave entra no sector central é adicionado no escalonamento das chegadas do aeroporto e feita uma requisição na *runway* respectiva para a hora esperada da aterragem.

4.5 Estratégias de separação

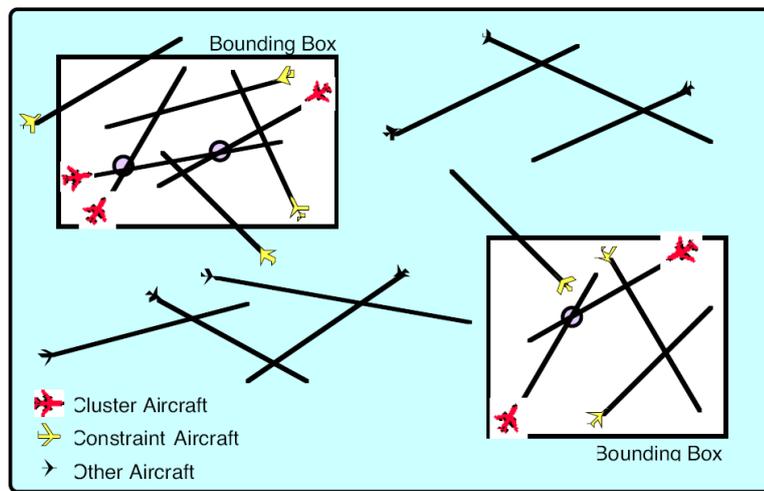
No 4º Seminário de gestão de tráfego aéreo [18] foi apresentado um estudo [19] sobre diferentes estratégias de garantir a separação entre aeronaves quando estas estão em voo. Neste estudo é apresentada uma estratégia que se baseia numa estratégia centralizada e outro numa estratégia descentralizada.

4.5.1 Estratégia centralizada

Esta estratégia é possível de ser aplicada num centro de controlo ATC, visto todo o controlo de operações poder ser feito por um agente. As operações presentes nesta estratégia são executadas periodicamente de minuto a minuto (valor adoptado no âmbito do teste). Pelo facto de esta gestão ser centralizada, o tempo de actualização, não é tão crítico como em estratégias descentralizadas, onde a frequência de verificação tem de ser maior. A implementação desta estratégia, neste estudo, foi baseada em conceitos apresentados pelos autores de [20] sobre o método iterativo “Space-Time Flow” (STF).

Em cada iteração do processo é analisado o intervalo de tempo (janela) até oito minutos depois do tempo actual, ou seja, a janela (T_i , T_f), considerando T_i o tempo actual e T_f o tempo final, poderá conter os seguintes valores: (0, 8), (1, 9), (2, 10), ..., (T_i , T_i+8). Em cada janela de oito minutos são então determinados os conflitos que ocorrerão nesse intervalo, se não houver mudanças das rotas. O algoritmo para calcular esses conflitos é descrito em pormenor em [20]. As colisões são agrupadas em áreas que para além de englobarem as aeronaves que causam conflitos são também tidas em conta as aeronaves que apresentem trajectórias que intersectem a caixa delimitadora, que restringem as acções a serem tomadas para resolver os conflitos existentes. A Figura 4.2 ilustra a janela de oito minutos (deslocação das aeronaves assinalado a rectas pretas), as caixas delimitadoras da zona de conflitos (Bounding Box) e os locais de colisão (círculos dentro das caixas delimitadoras).

Figura 4.2: Estratégia de Separação Centralizada



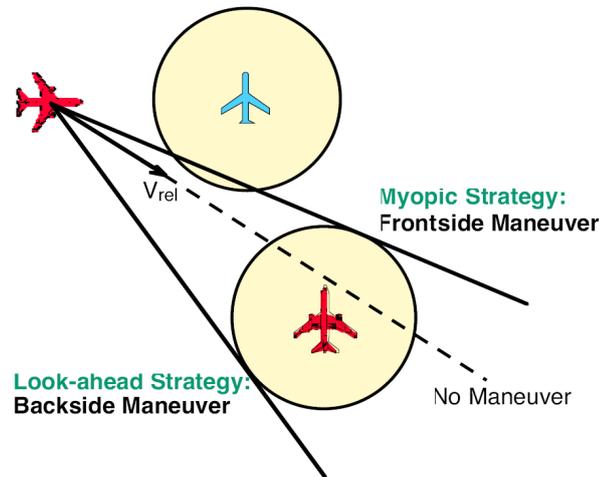
Para cada conflito de aeronaves é escolhida uma, que não irá sofrer nenhuma alteração na sua rota. À segunda aeronave é aplicado o método STF para alterar a rota desta aeronave de forma a não causar nenhum conflito com outra aeronave. No caso de haver conflito entre mais de duas aeronaves aplica-se novamente o método STF a esta e assim sucessivamente. Caso não seja encontrada uma solução é feita uma permutação da ordem de como as aeronaves foram seleccionadas, por exemplo, considerando as aeronaves A, B e C as hipóteses de ordenação seria a permutação entre as três, ou seja, A-B-C, A-C-B, B-C-A, B-A-C, C-A-B, C-B-A. Se os conflitos dentro de cada área forem demasiados o número de permutações pode ser limitado, para não provocar um processamento excessivo sobre o mesmo problema.

4.5.2 Estratégia descentralizada

Esta estratégia admite que as aeronaves é que são responsáveis por fazer o controlo das colisões, no entanto, como até já foi referido anteriormente, é facilmente possível de aplicar este mesmo conceito a controladores de um determinado centro de ATC.

À semelhança da estratégia anterior a janela de análise continua a ser de oito minutos posteriores ao tempo actual. São considerados conflitos as colisões causadas entre duas ou mais aeronaves nesse intervalo de tempo. No caso de estarem em conflito mais de duas aeronaves é aplicado um processo iterativo em que são resolvidas colisões entre duas aeronaves. Para este estudo efectuado os algoritmos utilizados foram apresentados em [21], em particular Myopic e Look-ahead, ilustrados na Figura 4.3.

Figura 4.3: Estratégia de Separação Descentralizada



Para cada resolução de conflitos existem duas manobras possíveis frontside e backside, que deve ter sido em conta na escolha a ser adoptada de forma a causar o mínimo de desvio possível entre a rota original e a nova rota a ser tomada. A estratégia Myopic, como o próprio nome indica em português (miopia), tem por objectivo determinar a resolução mais eficiente para tratar o conflito (manobra *frontside* ou *backside*) e que cause um desvio da rota inicial o mínimo possível. Caso esta escolha venha a provocar posteriormente um novo conflito este será tratado no próximo ciclo de análise. A estratégia Look-ahead determina igualmente, em primeiro lugar, qual a estratégia (manobra *frontside* ou *backside*) mais eficiente e de seguida verifica se essa manobra cria um conflito mais próximo do que o que está actualmente a ser tratado. Se for posterior executa essa manobra caso contrário procura executar a outra estratégia. Se a segunda estratégia resolver executa-a caso contrário entra num processo iterativo até encontrar um caminho que não cause conflitos, isto é, partindo da trajectória inicial vai incrementando 2 graus para cada lado (frontside ou backside) até encontrar uma solução. De notar que esta segunda solução pode levar a mudanças de rota superiores à da Myopic, no entanto, existe um cuidado adicional de tentar minimizar possíveis colisões nos próximos ciclos de análise (chamado efeito de dominó). Na estratégia Myopic apenas era tido em conta a resolução que servisse para o momento actual ignorando qualquer conflito que pudesse originar posteriormente.

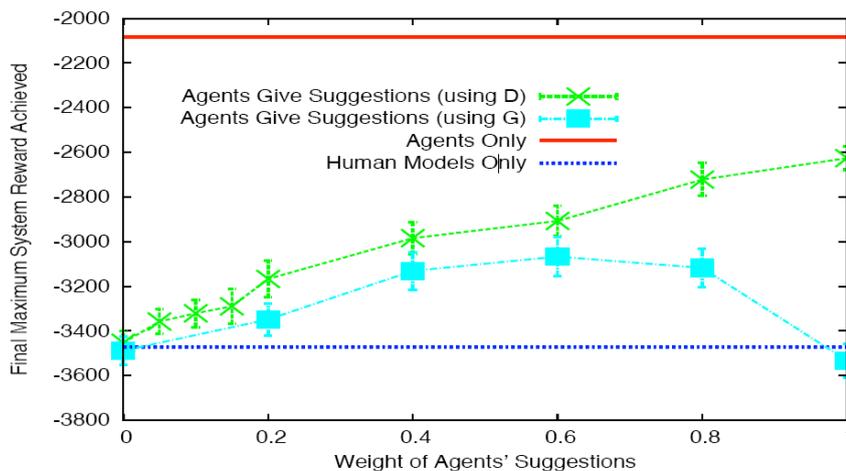
4.6 Outros estudos

Outras soluções têm sido também levantadas e estudadas, como por exemplo a aplicação de conceitos presentes na teoria dos jogos [22] só que em vez desta teoria ser aplicada de forma egoísta (vontade de vencer) é adaptada de forma a ser mais cooperativa

e tendo em conta as preferências do adversário (neste caso as outras aeronaves). Outro exemplo é a utilização de agentes com capacidade de aprendizagem e uso de recompensas [23]. Existe também alguns estudos já efectuados sobre possíveis arquitecturas dos sistemas multi-agentes para sistemas de ATM autónomos [24].

Outros estudos apontam ainda na direcção de agentes serem utilizados como entidades que fornecem sugestões aos ATCOs tendo estes últimos o poder de seguir os conselhos dados pelos agentes ou proceder com outra acção diferente [25]. Neste estudo conforme o nível de sintonia existente entre a sugestão de um determinado agente e a acção tomada pelo ATCO são fornecidos valores diferentes, de recompensas, aos agentes. É ainda feita uma análise entre dois tipos de recompensas focadas em objectivos diferentes. A Figura 4.4 ilustra os resultados obtidos desse estudo. No caso em que $w = 1$ (indicador de que o controlador apoia totalmente a sugestão do agente) nos sistemas em que há intervenção do ATCO não é tão bom como se só o agente existente. Uma razão adiantada para este facto é devido à necessidade do agente ter de aprender a dar boas sugestões, atrasando o seu desempenho.

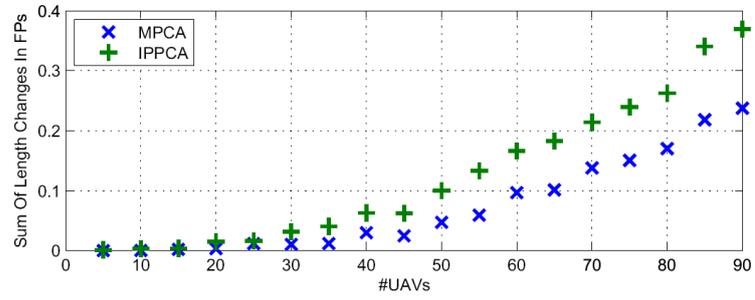
Figura 4.4: Impacto de Desempenho com Sugestões de Agentes



Um estudo mais genérico [26], que teve por objectivo comparar diferentes tipos de algoritmos utilizados no processo de evitar colisões, fez uma comparação entre multi-party algorithm collision avoidance (MPCA) e iterative peer-to-peer collision avoidance (IPPCA). O algoritmo IPPCA é uma extensão da optimização por pares para múltiplas colisões simultâneas, tendo em conta valores de utilidade de cada solução. O algoritmo MPCA é baseado em protocolos de negociação entre agentes (aeronaves) e tenta otimizar o bem-estar de ambas as aeronaves, ou seja, provocar menos desvios das rotas iniciais de cada aeronave. A Figura 4.5 apresenta os resultados obtidos, via experimental, da soma dos afastamentos (relativamente à rota original) que as aeronaves tiveram de efectuar para

evitar colisões.

Figura 4.5: Resultado Experimental do Desempenho dos Algoritmos MPCA e IPPCA



Capítulo 5

Arquitectura/Sistemas

Neste capítulo serão apresentados os diversos sistemas utilizados para o desenvolvimento deste projecto.

5.1 Simulação

Para efeitos de simulação são utilizados dois sistemas, Microsoft Flight Simulator X e SimConnect. Nesta secção será descrito o papel de cada um destes sistemas.

5.1.1 Microsoft Flight Simulator X

Como motor de simulação foi utilizado o Microsoft Flight Simulator X (FSX), que já se encontrava previamente definido à implementação do sistema, devido ao projecto de controlo dos veículos aéreos já utilizar este sistema, do qual faz parte integrante esta tese. O FSX é um jogo, desenvolvido pela Microsoft e que corresponde ao ultimar de uma longa e lendária saga (de 25 anos) dos diversos simuladores de voo (Flight Simulator) desenvolvidos também pela Microsoft [27]. Ao longo dos anos, o nível de realismo (providenciando ao utilizador) de todo o jogo tem aumentado progressivamente, nomeadamente a nível de gráficos 3D e jogabilidade. O jogo tem ainda sofrido melhoramentos na simulação do terreno assim como as o nível de detalhe de todo o jogo, na tentativa de recriar o globo terrestre em ambiente de jogo incluindo os diversos aeroportos existentes em cada região. Este foi também um factor bastante relevante para a escolha deste sistema como simulador, pela grande proximidade dos mapas (virtuais) com a realidade.

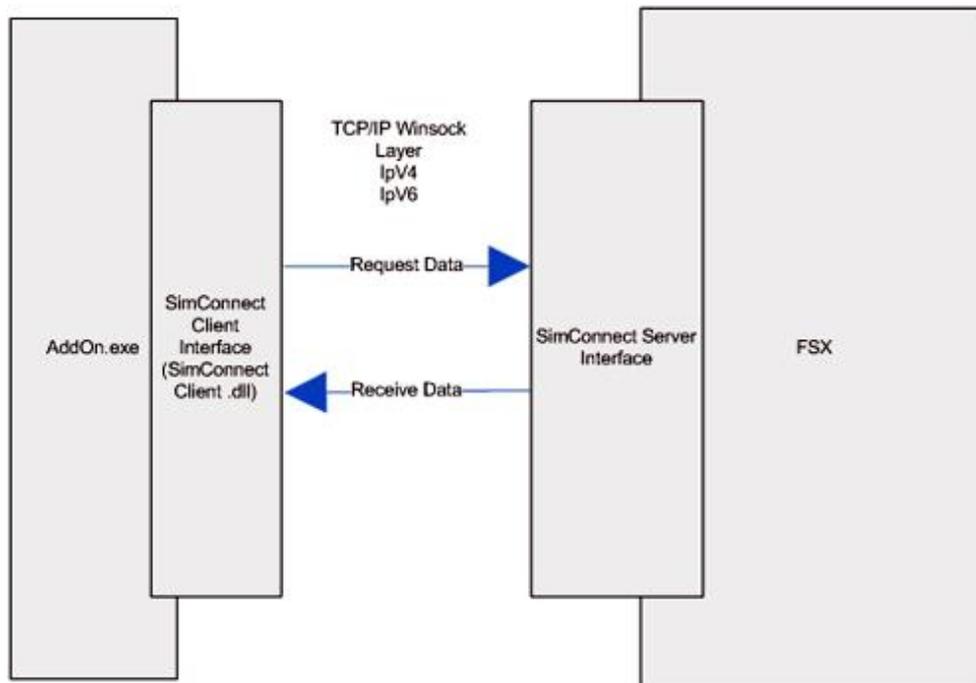
No entanto, apesar de o FSX ser considerado um jogo (e ser vendido como tal), consegue ir mais além, permitindo que haja um controlo automático de aeronaves por serviços externos ao simulador, não sendo necessário um utilizador estar a controlar a aeronave. Para usufruir desta funcionalidade do FSX surge a aplicação SimConnect.

5.1.2 SimConnect

SimConnect é um Kit de Desenvolvimento de Software (SDK - Software Development Kit) que pode ser utilizado pelos programadores para desenvolverem componentes de add-ons, escritos em C, C++, ou qualquer linguagem .Net (C#, VB.Net ou outra), para o produto Microsoft *ESP*. Microsoft *ESP* [28] é uma plataforma de simulação visual, de desenvolvimento de software, que utiliza tecnologia aplicada a jogos, para sistemas de apoio à decisão, treino e aprendizagem, sobre o qual o FSX foi desenvolvido. Esta tecnologia permite aos utilizadores viverem experiências com um nível de realismo bastante elevado, em ambientes terrestres, aéreos e marítimos [29].

Como forma de garantir que o envio e recepção de dados entre o FSX e aplicações externas fosse suportada e o mais organizada possível foi criado o SimConnect. O SimConnect é um protocolo de comunicação cliente-servidor flexível, poderoso e robusto, que permite acessos assíncronos de dados e eventos internos ao FSX. A utilização de uma comunicação assíncrona possibilita uma maior estabilidade da aplicação servidor, uso de ciclos de processamento mais eficientes e ainda ser mais seguro usar para aplicações que usam multi-threads e multi-processadores [30]. A Figura 5.1 apresenta o modo pelo qual o SimConnect se liga ao FSX usando um protocolo de comunicações *Winsock*.

Figura 5.1: Sistema Cliente-Servidor entre SimConnect e FSX



Alguns dos tipos mais comuns de componentes criados a partir de SimConnect são [31]:

- Substituir o meio de processamento do *ESP* de um ou mais eventos por um novo
- Gravar ou monitorizar um voo
- Aumentar o sistema de missões do *ESP*
- Criar e definir planos de voo para uma aeronave não controlada pelo utilizador (através de AI).
- Definir novas condições ou ambientes atmosféricos
- Permitir que novo hardware interaja com o *ESP*

Desta forma o SimConnect é utilizado neste projecto como forma de permitir à aplicação desenvolvida comunicar com o FSX, recebendo todos os dados necessários para a simulação e enviando todos os pedidos e ordens de acções a serem executadas.

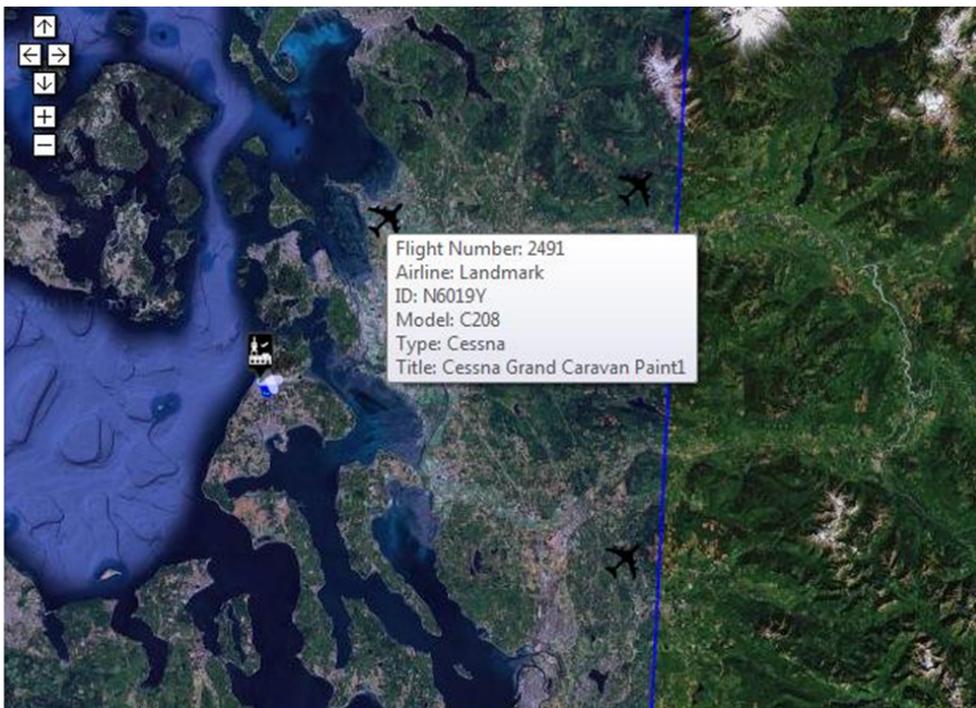
5.2 Comunicação

A abordagem a este trabalho baseia-se na criação de um sistema multi-agente, por essa razão foi utilizada uma Framework, desenvolvida em C# e que oferece uma vasta base de recursos para a criação de um sistema multi-agente também em C#. A Framework utilizada foi o AgentService [32], ferramenta *open-source*, que permite a criação e registo de múltiplos agentes em diferentes máquinas e disponibiliza serviços de páginas amarelas, usado para procurar agentes que se encontrem registados na plataforma. O AgentService é ainda capaz de fazer a gestão da execução das acções de agentes que sejam concorrentes e disponibiliza serviços de comunicação entre os diversos agentes com recurso a mensagens. O AgentService segue ainda as normas FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) usadas para este tipo de sistemas em que há comunicações através de mensagens entre diferentes agentes [33]. Desta forma, o AgentService engloba todas as características necessárias para a implementação do sistema pretendido, tornando-se por isso uma ferramenta bastante útil para o desenvolvimento do projecto. O AgentService apresenta algumas características adicionais que são pertinentes e que trariam vantagens para o projecto mas, visto que o AgentService ainda não se encontra num estado final apresenta algumas limitações em alguns dos serviços, pelo que não puderam ser já utilizados neste projecto. Nomeadamente, a utilização de um serviço chamado “Federation Manager” que possibilitaria o próprio registo de agentes ser efectuado em máquinas diferentes, mantendo-se todas interligadas que apresenta alguns erros na sua utilização através de aplicações externas [34].

5.3 Visualização

Com o objectivo de facilitar a interpretação de cada acção tomada pelo agente controlador de tráfego, a cada instante da simulação, foi introduzida na aplicação o plugin do GoogleMaps [35]. Este plugin permite obter uma visualização aérea do mundo assim como adicionar informação (linhas, marcadores, ...) sobre o próprio mapa. Com o recurso a este plugin foi possível simular o “radar” da simulação, mostrando, em tempo real, as posições de todas as aeronaves que circulam no espaço aéreo abrangido pelo controlador em questão. Como forma de ajudar a identificar qual a aeronave que se encontra num determinado local foi utilizada a funcionalidade de *tooltip* sobre cada aeronave que permite apresentar informação constante da aeronave, como por exemplo: o número do voo, a que companhia pertence, o modelo, entre outros. A Figura 5.2 apresenta um exemplo da informação disponibilizada.

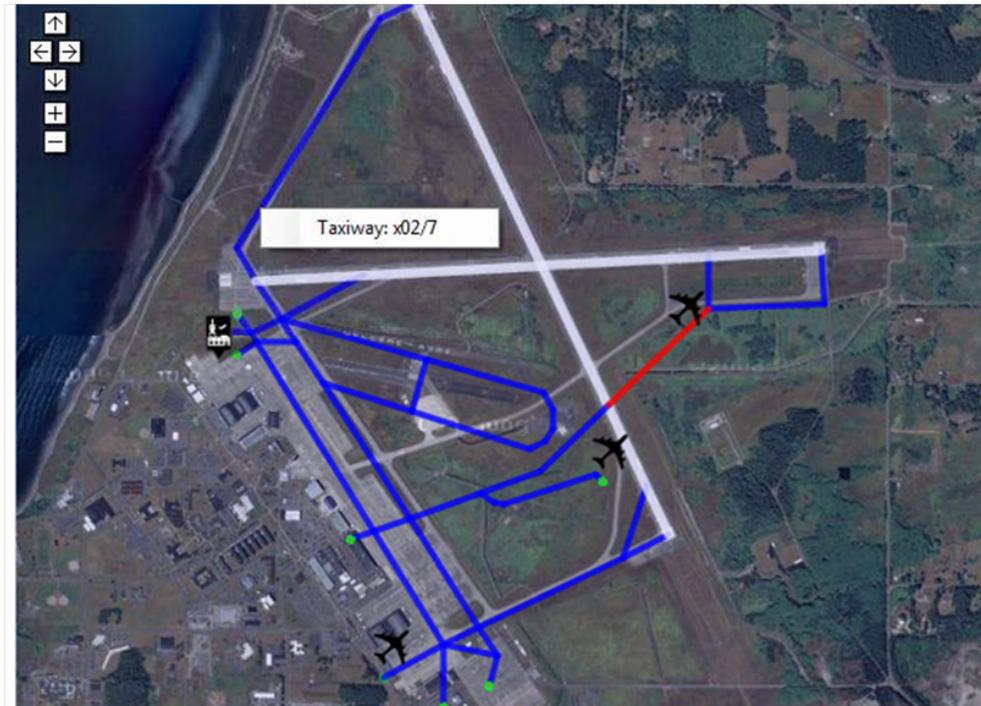
Figura 5.2: Interface - Exemplo de Mensagem Tooltip



Para além das aeronaves foi também marcada no mapa toda a estrutura do aeroporto necessária para o controlo do tráfego, nomeadamente as *runways*, *taxiways*, parques de estacionamento das aeronaves e ainda a localização da torre de controlo. Relativo às *runways* e às *taxiways* foi adicionada uma funcionalidade que permite ao utilizador saber o respectivo identificador, através de um clique sobre a *taxiway* ou *runway* respectiva. No caso das *taxiways*, relacionado com as manobras de taxi, foi adicionada uma funcionalidade que permite ao utilizador verificar quais as secções que estão a ser utilizadas em cada

momento. Estas secções são apresentadas sobre a cor vermelha ao contrário das *taxiways* que estão disponíveis que são apresentadas pela cor azul, ver Figura 5.3.

Figura 5.3: Interface - Exemplo de *Taxiways*



Capítulo 6

Detalhes de Implementação

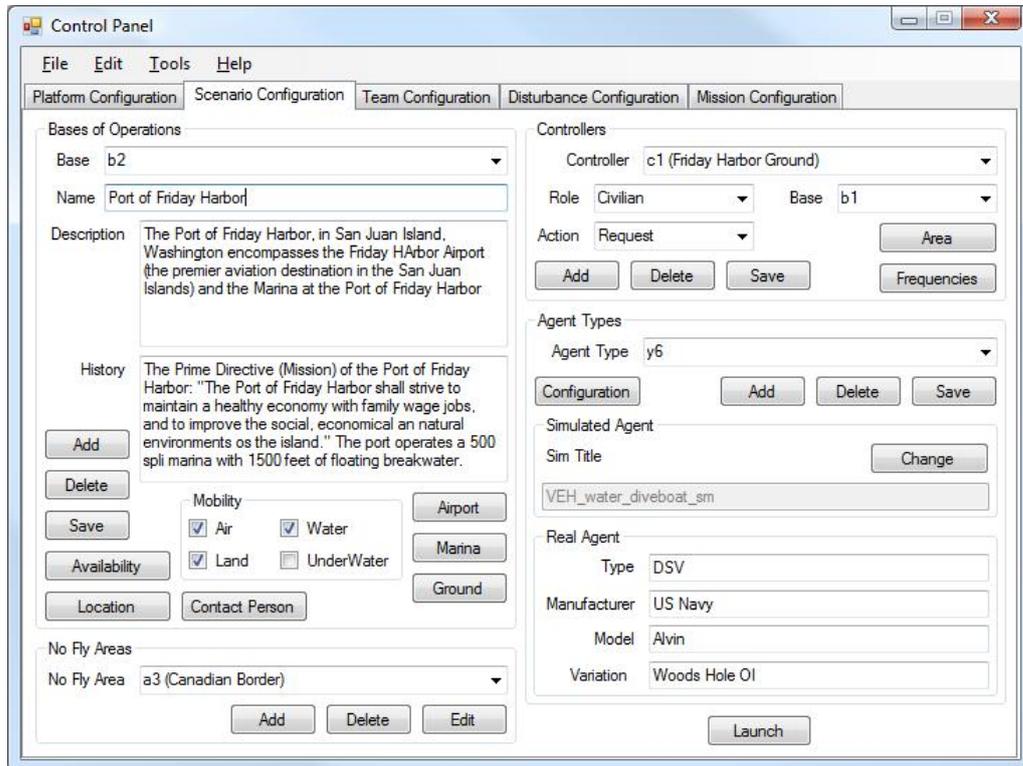
Neste capítulo serão descritos os detalhes da implementação, começando por explicar como é definido o cenário de simulação, seguido dos métodos de interpretação dessa mesma informação. As secções seguintes fazem referência às diferentes componentes dos protocolos definidos para a aplicação, nomeadamente os diferentes estados que uma aeronave pode apresentar, mensagens enviadas e recebidas das diversas entidades e ainda os procedimentos de cada entidade sobre cada um dos protocolos. A secção final apresentará a forma de utilização da aplicação.

6.1 Definição do Aeroporto

Antes de iniciar a simulação do Controlo de Tráfego Aéreo é necessário possuir um ficheiro que contenha a configuração de todo o cenário da simulação, nomeadamente a estrutura do aeroporto e os agentes controladores do tráfego. Para a criação deste ficheiro é usado o módulo “Control Panel” da aplicação já existente, onde é possível efectuar as diversas configurações para a simulação (desde a base de operações até aos agentes controladores do tráfego e dos veículos, Figura 6.1).

Detalhes de Implementação

Figura 6.1: Interface - Control Panel



No que diz respeito à estrutura do aeroporto, esta pode ser definida através do botão “Airport” dentro do grupo “Base of Operations” da Figura 6.1, onde será apresentado um formulário onde é possível inserir toda a informação relativa ao aeroporto e que é necessária à simulação 6.2.

Detalhes de Implementação

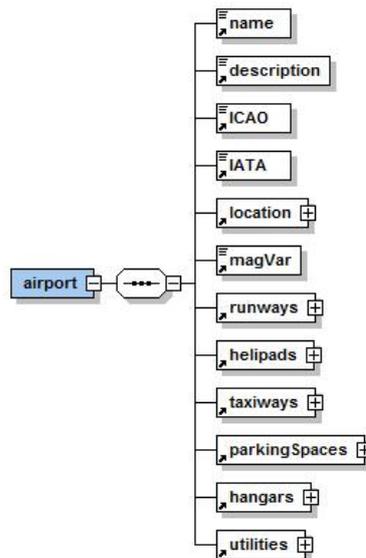
Figura 6.2: Interface - Control Panel (Criação do Aeroporto)

The screenshot shows a software interface for creating an airport. The main window is titled "Airport" and contains several sections:

- Name:** Friday Harbor Airport
- ICAO Code:** KFHR
- IATA Code:** FRD
- Description:** Friday Harbor Airport began as a dream for Roy Franklin, the founder of Island Sky Ferries. When he began his charter service in 1948, he landed his Stinson 'Bushman' in a cow pasture west of town with the aid of headlights from parked cars. Whether transporting patients during medical emergencies or flying work crews to outlying islands, Roy Franklin embodied the spirit of American aviation. The airport
- Mag. Variation:** -20
- Utilities:** Utility: u1, Designation: Tower, Latitude: 48° 31' 38.91" N, Longitude: 123° 1' 35.56" W, Altitude: 37, Radius: 2.55 m, Height: 129 m.
- Runways, Taxiways, Hangars:** Buttons for adding and managing these elements.
- Helipads:** Helipad: (empty), Designation: (empty), Surface: (empty), Latitude: (empty), Longitude: (empty), Altitude: (empty), Radius: (empty).
- Parking / Gates:** Parking: p1, Type: Medium, Designation: Parking Ramp A, Description: Usually used for medium sized aircraft, Latitude: 48° 31' 25.67" N, Longitude: 123° 1' 34.48" W, Altitude: 37 amsl, Radius: 10 ft, Connection: xB, Latitude: 48° 31' 25.69" N, Longitude: 123° 1' 32.44" W, Altitude: 37 amsl.

Os elementos básicos necessários para a configuração do aeroporto são apresentados na Figura 6.3. Para uma vista mais detalhada sobre os elementos runways, taxiways e parkingspaces, consultar o Anexo A.

Figura 6.3: Elementos para a Configuração do Aeroporto



6.2 Interpretação do Aeroporto

Nesta secção é descrita a forma como é interpretada e representada a informação retirada do ficheiro de configuração (XML) do cenário a ser utilizado para a simulação na aplicação.

6.2.1 Interpretação das *taxiways*

As *taxiways* são uma das entidades mais importantes para o controlo do tráfego das aeronaves que circulam no aeroporto. Desta forma, foi importante definir uma estrutura de dados adequada para essa informação. A estrutura de dados escolhida foi a representação das *taxiways* sob a forma de um grafo. Um grafo é uma representação abstracta de um conjunto de objectos (vértices ou nós) que podem ser relacionados através de ligações (arestas), direccionadas ou não e pesadas ou não. Neste caso foi utilizado um grafo não direccionado, isto é, a transição entre dois nós, que estejam ligados por uma aresta, pode ser feita em ambos os sentidos e com pesos, neste caso, o comprimento de cada aresta. Desta forma, fazendo a correspondência das *taxiways* para o grafo, foi considerado que cada nó do grafo representa qualquer mudança de direcção de uma *taxiway* ou um cruzamento entre duas ou mais *taxiways* ou entre uma *taxiway* e uma *runway*. As arestas do grafo representam secções de *taxiways*. Com esta implementação uma *taxiway* pode corresponder a diferentes arestas no grafo. Esta situação acaba por ser vantajosa, pois facilita a representação de várias aeronaves a circularem em secções diferentes de uma determinada *taxiway*, como acontece efectivamente no mundo real onde diversas aeronaves podem circular na mesma *taxiway* mas em “secções” diferentes. Foi ainda feita uma adaptação para os parques das aeronaves (*parking spaces*), que foram considerados também como nós do grafo, isto é, como pontos terminais de secções de *taxiways*.

A interpretação de cada cruzamento (com *runway* ou *taxiway*), mudança de direcção de uma *taxiway* ou ainda como a localização de um *parking space* como um nó tem quatro vantagens, uma para cada tipo de nó. No caso de o nó ser representativo de uma mudança de direcção de um *taxiway* permite que cada secção seja interpretada como uma linha recta, sendo mais fácil calcular qualquer ponto que faça parte dessa secção (por exemplo, calcular um ponto de paragem que se situe dentro de uma determinada secção) e ainda ser mais fácil de representar graficamente. Se o nó representar um cruzamento entre duas ou mais *taxiways* facilita a interpretação de possíveis direcções que podem ser tomadas no cruzamento respectivo. Se o nó representar o cruzamento de uma *taxiway* com uma *runway*, permite facilmente saber os diferentes pontos de entrada, ou saída, de uma *runway*. Esta informação é útil para, por exemplo, após a aterragem de uma aeronave sobre a *runway* saber qual os diferentes pontos de saída da mesma, ou em perspectiva inversa, saber por que locais se pode efectuar a entrada numa *runway* para levantar voo. Por fim, se o nó representar a localização de um parque permite que este seja considerado

um ponto com uma ligação directa a uma secção de *taxiway*, mesmo tratando-se de uma entidade diferente.

A utilização do grafo como estrutura de dados para as *taxiways* torna-se ainda mais vantajosa pela sua facilidade em utilizar algoritmos capazes de encontrar caminhos entre dois pontos/nós. De forma a evitar a execução frequente do cálculo de um caminho entre dois pontos (a cada pedido de taxi desde o parque até à *runway* ou vice-versa) durante a simulação foi definido que após carregar a informação das *taxiways* para o sistema fossem calculados os caminhos mais curtos entre cada par de nós do grafo e guardados numa tabela, como mostra a Figura 6.4. O algoritmo para encontrar o caminho mais curto entre os nós foi o algoritmo de Dijkstra [36]. Este algoritmo é utilizado tantas vezes quanto o número de nós existentes no grafo, do qual, em cada iteração é calculado o caminho mais curto entre o nó inicial e todos os outros nós do grafo.

Figura 6.4: Tabela com Caminhos entre Nós do Grafo

		Nó Destino				
		D ₁	D ₂	D ₃	. . .	D _n
Nó Origem	O ₁	O ₁ -D ₁	O ₁ -D ₂	O ₁ -D ₃	. . .	O ₁ -D _n
	O ₂	O ₂ -D ₁	O ₂ -D ₂	O ₂ -D ₃	. . .	O ₂ -D _n
	O ₃	O ₃ -D ₁	O ₃ -D ₂	O ₃ -D ₃	. . .	O ₃ -D _n

O _n	O _n -D ₁	O _n -D ₂	O _n -D ₃	. . .	O _n -D _n	

Para permitir fazer a gestão do tráfego das aeronaves que circulam sobre as *taxiways* foi relacionada, às arestas (secções das *taxiways*), informação sobre as utilizações dessa secção, nomeadamente aeronaves que têm caminhos previstos a passar por esta secção e a aeronave que num determinado momento circula na secção. Neste último caso foi ainda introduzida informação sobre a orientação da aeronave, através do registo do ponto de entrada nessa mesma secção. Esta informação torna-se vital para o controlo do tráfego no aeroporto quando pretendido encontrar um caminho de *taxiways* que liguem dois pontos do aeroporto.

6.2.2 Interpretação das *runways*

Para a interpretação das *runways* é usada uma lista que guarda todas as *runways* existentes no aeroporto. Para facilitar no acesso a alguma informação que relaciona as

runways, após carregar todas as propriedades das mesmas são calculadas todas as intercepções existentes entre *runways* no aeroporto. Este processamento inicial torna-se útil para a avaliação, durante a simulação, das permissões (para aterrar e levantar) das aeronaves numa determinada *runway*. Associada a cada intercepção ambas as *runways* perservam quer as coordenadas do ponto de intercepção quer a *runway* que a intercepta.

De forma semelhante às *taxiways*, cada *runway* guarda também todas as ligações que possui com as *taxiways*. A utilização desta informação associada a cada *runway* (mesmo ficando redundante pela existência da mesma informação nas *taxiways*) vem aumentar a eficiência em diversos cálculos que envolvem as duas entidades. Por exemplo, considere-se uma situação onde a aeronave efectua a manobra de chegada, já estando a circular sobre a *runway* (logo após ter aterrado). Nesta situação, o cálculo do ponto de saída mais próximo para abandonar a *runway* e entrar numa *taxiway*, fica simplificado. Desta forma basta percorrer as conexões que a *runway* possui em vez de percorrer todas as *taxiways* existentes no aeroporto à procura de uma que tenha ligação com a *runway* em questão.

Torna-se ainda útil ter um registo de todas as aeronaves que têm, de alguma forma, relação com a *runway* em questão. Esta informação é vantajosa quando é necessário avaliar o estado actual da *runway* (se está a ser usada ou não). Por exemplo, em casos de mudança de estado da *runway*, fica simplificada a acção de saber quais as aeronaves que poderão usufruir dessa alteração do estado, bastando para isso percorrer apenas as aeronaves que estejam relacionadas com a *runway* em vez de percorrer todas as aeronaves existentes no “radar”.

Em todo este processamento com as *runways*, explicado nesta secção até ao momento, são considerados os dois sentidos da *runway*. No entanto, em algumas situações da simulação, torna-se necessário fazer uma distinção de qual o sentido que está a ser usado. Desta forma foi criada uma estrutura de dados auxiliar que relaciona uma determinada *runway* com um dos sentidos, permitindo aceder à definição de qual as coordenadas do início e fim da *runway*, orientação e designação. No entanto, esta estrutura permite que se aceda a toda a informação relativa à *runway* referida anteriormente.

6.2.3 Interpretação de outros elementos

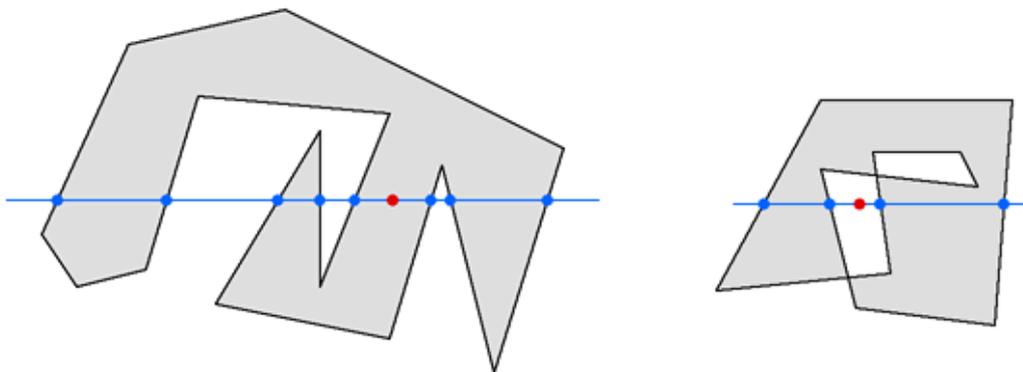
Como já referido a interpretação dos parques é directamente relacionada com as *taxiways*, pois existe sempre uma ligação directa entre as *taxiways* e os parques. No entanto para poder efectuar um rápido acesso a todos os parques existentes num determinado aeroporto, estes encontram-se “registados” numa lista de parques. Esta lista permite efectuar uma pesquisa rápida sobre todos os parques existentes no aeroporto que sejam da mesma companhia de uma aeronave que esteja a aterrar.

Ao transpôr a definição do radar, considerado que este se encontra na localização da torre de controlo, para obter todas as aeronaves que se encontrem numa determinada

região centrada nele foi efectuado um pedido ao FSX para devolver todas as aeronaves que se encontram num determinado raio (R) de centro (C). No entanto esse pedido apenas é disponibilizado para a área envolvente ao veículo do utilizador do FSX, não admitindo a um outro veículo obter essa informação. Desta forma, foi necessário transportar o veículo do utilizador para a localização da torre de controlo (ponto C) e posteriormente, ter em conta a distância entre o radar e o ponto mais distante da região a ser monitorizada, visto que a região de controlo de um determinado agente não é necessariamente circular.

Durante a simulação, para saber se uma determinada aeronave se encontra dentro da região monitorizada (polígono) é utilizado um algoritmo baseado em *Ray Casting* [37]. O conceito base deste algoritmo é a utilização de um “feixe”, por exemplo um horizontal, que atravesse um determinado polígono na mesma altura do ponto a verificar e determinar se o número de cruzamentos entre esse feixe e as arestas do polígono são número ímpar (indicando que o ponto está dentro do polígono) ou se são em número par (indicando que o ponto está fora da região do polígono). Com este método é possível efectuar essa avaliação em polígonos com ou sem concavidades. A Figura 6.5 demonstra a utilização deste método a dois polígonos com concavidades (esquerda) e “buracos” (direita).

Figura 6.5: Aplicação do algoritmo baseado em Ray Casting



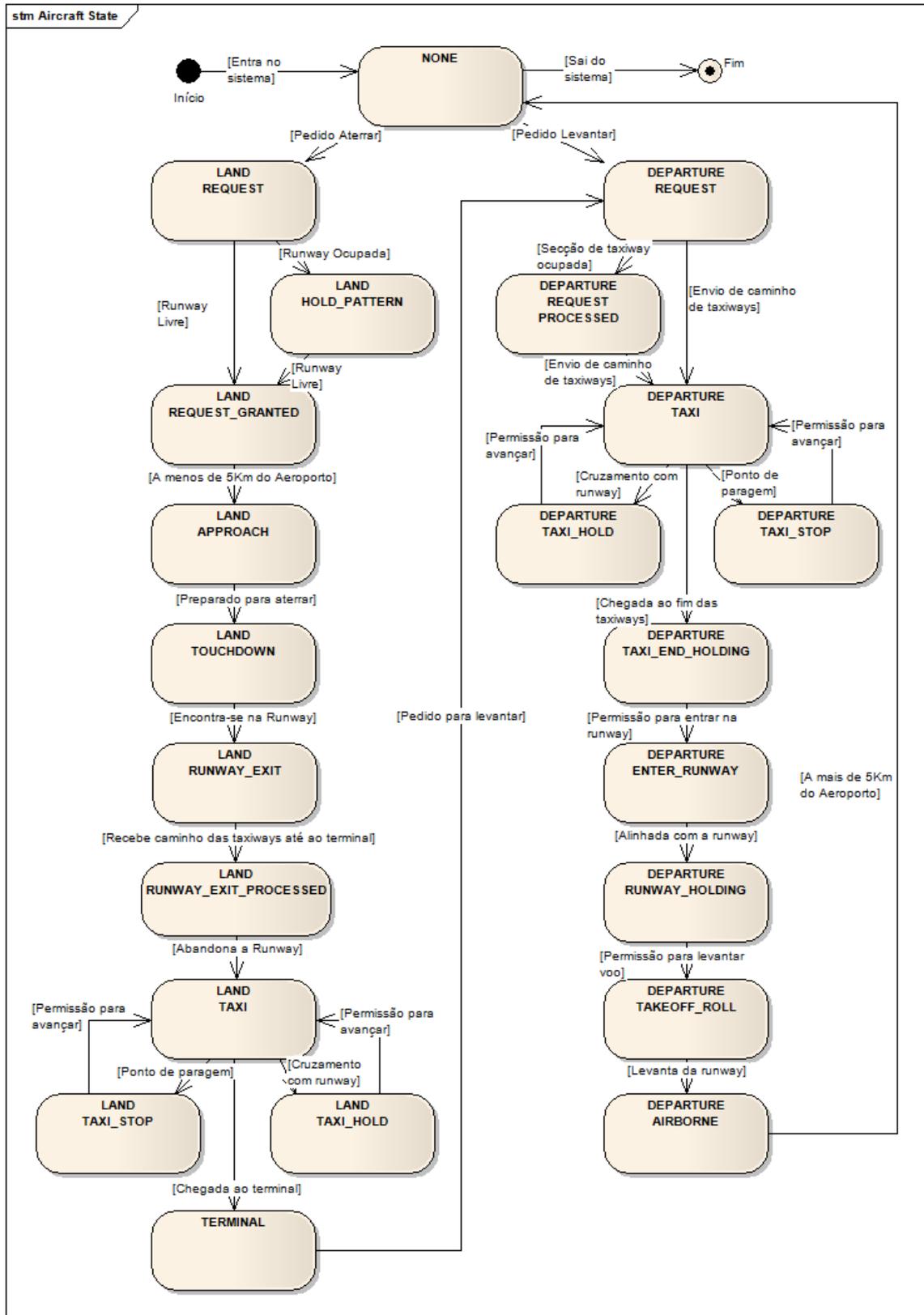
6.3 Estados das Aeronaves

Foi utilizada uma máquina de estados para caracterizar a acção que a aeronave desempenha num preciso momento. A utilização destes estados tornou-se bastante útil, trazendo várias vantagens para todo o processo de gestão do tráfego. Na análise do estado de uma *runway*, por exemplo, para saber se é possível a uma aeronave fazer aproximação à pista apenas é necessário analisar as aeronaves que estão relacionadas com a *runway* em questão e verificar o estado da manobra que desempenha actualmente. Este estado

vai ser capaz de informar se a aeronave se encontra numa manobra de chegada ou de partida e a sua acção concreta dessa mesma manobra. Uma outra grande vantagem de usar estados nas aeronaves é visível aquando uma actualização da mesma no radar (mudança de posição). Neste caso, ao saber o estado em que se encontra a aeronave, o número de operações que têm de ser verificadas é mais reduzido, aumentando desta forma a eficácia de todo o sistema. Por exemplo, se uma aeronave está a pedir permissão para aterrar, não se torna necessário analisar as *taxiways* à procura de conflitos (a aeronave ainda está em voo) bastando apenas verificar o estado da *runway* e todas as aeronaves relacionadas com ela. A Figura 6.6 apresenta a sequência de estados das diversas acções desempenhadas pelas aeronaves, quer na manobra de partida ou chegada.

Detalhes de Implementação

Figura 6.6: Máquina de Estados das Aeronaves



Sempre que uma nova aeronave entra no sistema o seu estado é colocado como “NONE”. A partir desse estado são aceites duas transições, uma para cada tipo de manobra, caso a aeronave se encontre em voo e pretenda aterrar no aeroporto ou já se encontre no aeroporto e pretenda iniciar a marcha de partida.

Se o pedido enviado pela aeronave for o de aterrar num aeroporto, o seu estado transita para “LAND_REQUEST”, indicando que já efectuou o pedido e aguarda instruções. Em resposta a esse pedido o ATCO poderá responder indicando que tem permissões para aterrar, transitando para “LAND_REQUEST_GRANTED” ou que terá que aguardar permissão para tal, efectuando a manobra de *hold pattern*. Se for dada ordem de aguardar permissão de aterragem o estado da aeronave transitará para “LAND_HOLD_PATTERN”, só saindo deste estado assim que receber confirmação por parte do ATCO.

O estado seguinte é “LAND_APPROACH”, indicando que a aeronave já se encontra perto da *runway* e a proceder ao alinhamento da sua trajectória com a *runway* respectiva. Assim que a aeronave entra em contacto com a *runway* o estado altera-se para “LAND_TOUCHDOWN”, seguido de “LAND_RUNWAY_EXIT” onde aguarda o caminho de *taxiways* a ser utilizado. Quando a aeronave recebe o caminho transita para “LAND_RUNWAY_EXIT_PROCESSED”, onde permanece até abandonar a *runway* pela saída indicada pelo ATCO.

Os próximos estados são referentes à acção de taxi, que começa por “LAND_TAXI” podendo transitar para “LAND_TAXI_STOP” quando a aeronave efectua uma paragem numa determinada secção de *taxiway* para evitar colisão com outra aeronave. Quando a aeronave efectua paragem numa intercepção da *taxiway* actual com uma *runway* o estado para onde transita é o “LAND_TAXI_HOLD”. Após qualquer um destes dois estados, a aeronave, volta novamente para o estado de “LAND_TAXI” até que chegue ao parque respectivo (*parking space*), passando desta forma para “TERMINAL”.

Do estado “TERMINAL”, assim como o estado “NONE”, após a aeronave enviar o pedido de partida, altera o seu estado para “DEPARTURE_REQUEST”. Novamente, e à semelhança do pedido de aterragem, o ATCO poderá conceder imediatamente permissão para iniciar a acção de taxi, passando a aeronave a encontrar-se no estado “DEPARTURE_TAXI” ou então, se a aeronave tiver de aguardar essa permissão para iniciar a manobra de taxi, transita para “DEPARTURE_REQUEST_PROCESSED”.

Iniciada a acção de taxi, em semelhança à acção de taxi da manobra de chegada, a aeronave pode transitar para o estado de “DEPARTURE_TAXI_STOP” ou “DEPARTURE_TAXI_HOLD”. O estado para onde a aeronave transita assim que termina o taxi é o “DEPARTURE_TAXI_END_HOLDING” que indica que a aeronave se encontra à entrada da *runway*, aguardando permissão para entrar na mesma. Quando recebe essa permissão transita para “DEPARTURE_ENTER_RUNWAY”.

O estado seguinte da manobra (“DEPARTURE_RUNWAY_HOLDING”) indica que a aeronave já se encontra na *runway* e pronta para iniciar a descolagem. Quando o

ATCO fornece permissão para a aeronave descolar, o seu estado transita para “DEPARTURE_TAKEOFF_ROLL”. O último estado referente à manobra de partida é o “DEPARTURE_AIRBORNE” que indica que a aeronave já descolou mas ainda se encontra próxima do aeroporto. Quando se afasta deste volta ao estado inicial (“NONE”).

6.4 Protocolos de Comunicação

Nesta secção serão apresentados os protocolos utilizados para a troca de mensagens entre o ATCO e as aeronaves. As mensagens que foram definidas para este protocolo tiveram por base as mensagens que são actualmente trocadas entre as torres de controlo e as diversas aeronaves [3, 38]. A utilização de um protocolo, semelhante ao usado actualmente, para além de obter uma aproximação com o real, possibilita a implementação futura deste sistema para a vida real.

6.4.1 Estrutura das mensagens

Pelo facto de se tratarem de agentes que trocam as mensagens, em vez de comunicações via rádio entre dois humanos, foram introduzidos alguns campos adicionais (<params>) em algumas das mensagens utilizadas. Estes campos permitem uma partilha de informação entre o ATCO e a aeronave e uma mais rápida interpretação da acção a tomar em cada situação. Foi ainda definido que o conteúdo (**content**) de uma mensagem apresenta duas informações distintas. A informação que é sempre estática (as palavras chave de cada mensagem, que de certa forma definem qual o tipo da mensagem em questão) aparece na mensagem do protocolo como maiúsculas, ao contrário da informação que é dinâmica (pode obter vários valores, por exemplo: coordenadas ou identificadores de uma *runway* ou direcções) aparecem em minúsculas. A utilização desta distinção vem facilitar a interpretação da mensagem recebida e o conhecimento *a priori* da informação que está presente na mensagem.

As mensagens utilizadas para comunicar entre os diversos agentes (ATCO e aeronave) apresentam a seguinte estrutura:

- **From** - (Remetente) indica qual o agente que envia a mensagem
- **To** - (Destinatário) indica qual o agente a que se destina a mensagem
- **Performative** - (Performativa) indica qual o tipo de mensagem enviada (“request”, “inform”, entre outros) [39]
- **Conversation-id** - (Conversa) representa o identificador da conversa a ser utilizada
- **protocol** - (Protocolo) indica se corresponde ao protocolo de aterragem ou de partida

Detalhes de Implementação

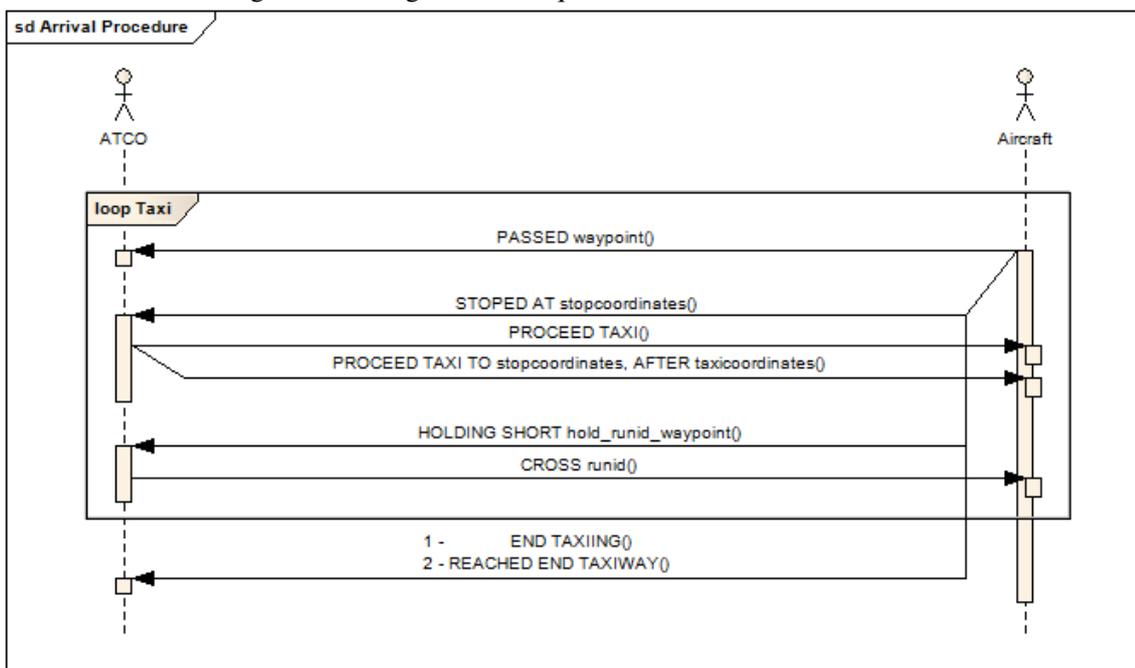
- **content** - (Conteúdo) indica qual o conteúdo da mensagem e os diversos parâmetros adicionais à mensagem
- **<params>** - (Parâmetros) dependendo do conteúdo da mensagem e das diversas variáveis referentes ao seu conteúdo aparecem indicadas pelo seu identificador (letras minúsculas no seu conteúdo) a informação respectiva

O valor do campo **<params>** enviado numa mensagem, seja ela de ou para o ATCO, encontra-se serializado quando não se trata de um objecto do tipo *string*. A utilização do método de serialização do objecto permite a fácil interpretação e posterior uso do receptor da mensagem, bastando para isso efectuar a desserialização. Para este processo é necessário saber qual o tipo do objecto serializado, porém como o parâmetro contém o nome da variável identificadora (letras minúsculas do campo **content**) já é sabido *a priori* qual o tipo dessa mesma variável.

6.4.2 Protocolo de Taxi

O protocolo de taxi é apresentado aqui em separado por ser usado na manobra de chegada e de partida, apenas com uma variação numa das mensagens. A Figura 6.7 apresenta a sequência das mensagens que são trocadas durante o protocolo de taxi.

Figura 6.7: Diagrama de Sequência - Procedimento de Taxi



Quando a aeronave se encontra a efectuar taxi no aeroporto pode enviar quatro tipos de mensagens para o ATCO dependendo da sua situação actual. No caso em que a aeronave passa por um ponto de controlo do seu percurso (mudança de direcção ou cruzamento com outra *taxiway*) comunica ao ATCO que passou por esse ponto respectivo. Desta forma o ATCO pode actualizar os estados das diversas secções de *taxiway* envolvidas (a secção que a aeronave abandona e a secção para onde a aeronave entrou). Esta comunicação é feita através da mensagem “PASSED *waypoint*”, onde *waypoint* indica a coordenada desse ponto de controlo.

Uma outra situação em que a aeronave tem de comunicar ao ATCO é quando esta se encontra parada numa secção, num ponto previamente definido (pelo ATCO) que tem por objectivo evitar colisões entre aeronaves que têm caminhos a passar por um mesmo cruzamento. Nestas situações a aeronave envia a mensagem “STOPPED AT *stopcoordinates*”, onde *stopcoordinates* indica as coordenadas da posição onde a aeronave está parada. Esta fica à espera até receber novas instruções do ATCO, quando a aeronave puder prosseguir caminho. Uma das mensagens que pode ser usada é a de “PROCEED TAXI” que indica à aeronave que pode prosseguir o seu caminho, não tendo de efectuar mais nenhuma paragem deste tipo até chegar ao seu destino (quer seja uma *runway* ou um *parking space*). No caso em que a aeronave tem permissões para continuar a fazer taxi mas irá necessitar de efectuar outra paragem deste tipo é acrescentada alguma informação adicional à mensagem anterior. É acrescentada informação referente às coordenadas do novo ponto de paragem (*stopcoordinates*) e, para auxiliar o processamento desta instrução por parte da aeronave, é também enviado o ponto de controlo (*taxicoordinates*) imediatamente anterior a esse ponto de controlo. Desta forma a estrutura da mensagem enviada é a seguinte: “PROCEED TAXI TO *stopcoordinates*, AFTER *taxicoordinates*”. O valor de *taxicoordinates* torna-se relevante para a aeronave pois esta já contém todo o percurso que necessita de fazer no seu processo de taxi, no entanto para não estar constantemente a comparar a sua posição actual com o novo ponto de controlo, ao fornecer esta informação, basta efectuar essa comparação após passar pelo ponto *taxicoordinates*.

Nas situações em que uma aeronave chega a um cruzamento com uma *runway* é necessário efectuar uma paragem neste local e aguardar permissão do ATCO para efectuar o cruzamento dessa mesma *runway*. Desta forma, assim que a aeronave pára perto do cruzamento envia a mensagem “HOLDING SHORT *hold_runid_waypoint*” para o ATCO, onde *hold_runid_waypoint* indica a coordenada desse ponto de paragem. O ATCO, após considerar que é seguro para a aeronave cruzar a *runway* em questão, comunica essa situação através da mensagem “CROSS *runid*” indicando no parâmetro *runid* o identificador da *runway* a ser cruzada.

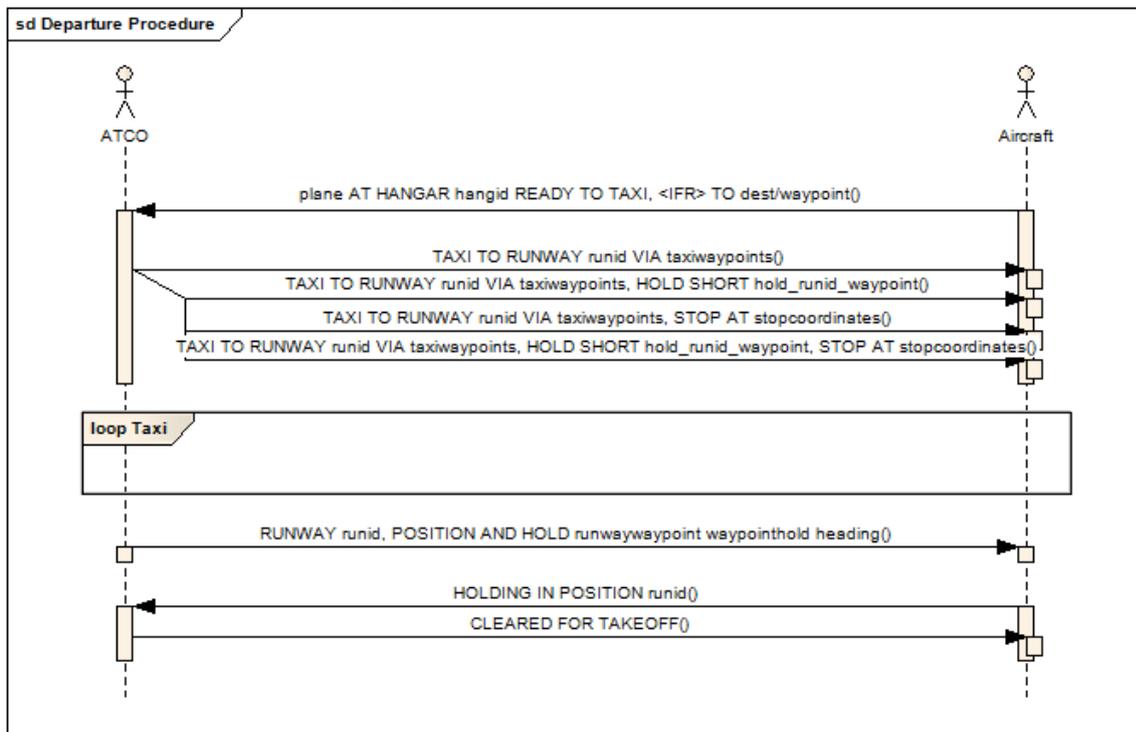
A última mensagem deste protocolo de taxi é a comunicação da aeronave ao ATCO da sua chegada ao ponto final do seu percurso de taxi. Neste caso a mensagem a ser enviada ao ATCO varia dependendo da manobra que está a ser executada. Mesmo que a nível

prático a acção resultante do envio de qualquer uma das mensagens seja a confirmação de que a aeronave chegou ao fim do taxi, são enviadas estas duas mensagens distintas por semelhança ao protocolo usado actualmente. Desta forma se a manobra for de chegada a mensagem enviada é “END TAXIING” no caso de a manobra ser de partida a mensagem enviada é “REACHED END TAXIWAY”.

6.4.3 Protocolo de Partida

O protocolo de partida abrange todas as comunicações existentes entre o pedido da aeronave para sair do seu *parking space* até que levanta voo do aeroporto. A Figura 6.8 apresenta a sequência das mensagens que são trocadas durante o protocolo de partida.

Figura 6.8: Diagrama de Sequência - Procedimento de Partida



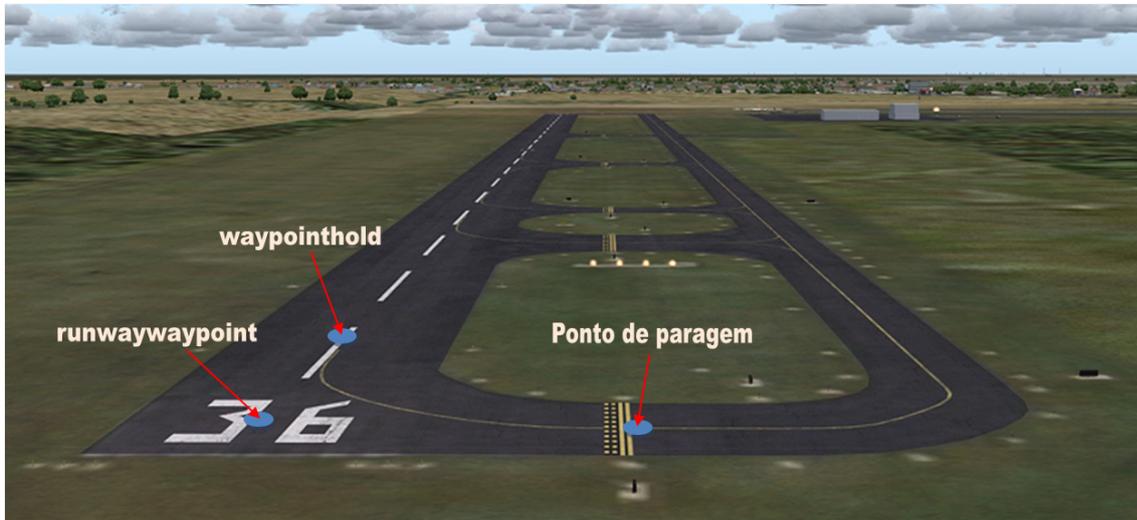
A mensagem que dá início ao protocolo de partida é enviada por parte da aeronave fazendo a comunicação ao ATCO da sua intenção de sair do parque (*hangid*), onde se encontra, juntamente com as coordenadas de destino da sua rota (*dest/waypoint*) necessárias para o cálculo da *runway* mais favorável para uma viagem nessa direcção. Apenas como mera indicação de protocolo é também notificada a própria aeronave através de *plane*. Desta forma a mensagem enviada apresenta a seguinte estrutura: “*plane AT HANGAR hangid READY TO TAXI, <IFR> TO dest/waypoint*”.

Em resposta ao pedido da aeronave para iniciar a sua marcha, o ATCO responde com a identificação do número da *runway* escolhida para levantar voo (*runid*) e a sequência de coordenadas que definem o caminho das *taxiways* (que ligam o *parking space* com a *runway*). Essa mensagem apresenta a seguinte estrutura: “TAXI TO RUNWAY *runid* VIA *taxiwaypoints*”. No entanto, esta mensagem pode ser completada com alguma informação extra, caso seja necessária:

- “... , HOLD SHORT *hold_runid_waypoint*” - esta instrução é usada quando o percurso definido para a operação taxi cruza uma ou mais vezes com alguma *runway*. Nestas situações é fornecida uma lista (*hold_runid_waypoint*) de todos os pontos onde a aeronave deverá efectuar uma paragem antes de cruzar com a *runway* em questão.
- “... , STOP AT *stopcoordinates*” - em situações em que o ATCO prevê possíveis colisões entre duas trajectórias de aeronaves, para as evitar envia adicionalmente uma posição de paragem (*stopcoordinates*). Esta posição situa-se na secção anterior de *taxiway* ao local onde é prevista que a colisão possa acontecer.
- “... , HOLD SHORT *hold_runid_waypoint*, STOP AT *stopcoordinates*” - corresponde a uma junção de ambas as mensagens anteriores que indica que o trajecto definido cruza com uma ou mais *runways* (*hold_runid_waypoint*) e que foi definido um ponto de paragem na sua trajectória de forma a evitar colisões (*stopcoordinates*).

A fase seguinte corresponde ao **Protocolo de Taxi** apresentado na secção 6.4.2. Quando a aeronave chega ao final da *taxiway* a mensagem enviada para o ATCO é “REACHED END TAXIWAY”. De seguida o ATCO consulta o estado da *runway* em questão e analisa se é possível para a aeronave entrar na *runway*. Caso seja possível envia a mensagem “RUNWAY *runid*, POSITION AND HOLD *runwaywaypoint waypointhold heading*”. Nesta mensagem é identificada a *runway* em questão, através de *runid* e a orientação da mesma com o campo *heading*. São ainda enviados dois pontos adicionais que facilitam a manobra a ser executada pela aeronave, sendo que o primeiro ponto (*runwaywaypoint*) indica a posição directa da entrada na *runway* e o segundo (*waypointhold*) a posição onde a aeronave deverá aguardar por permissão para *takeoff*. A Figura 6.9 ilustra a posição destas duas coordenadas.

Figura 6.9: Pontos para Entrada na *Runway*

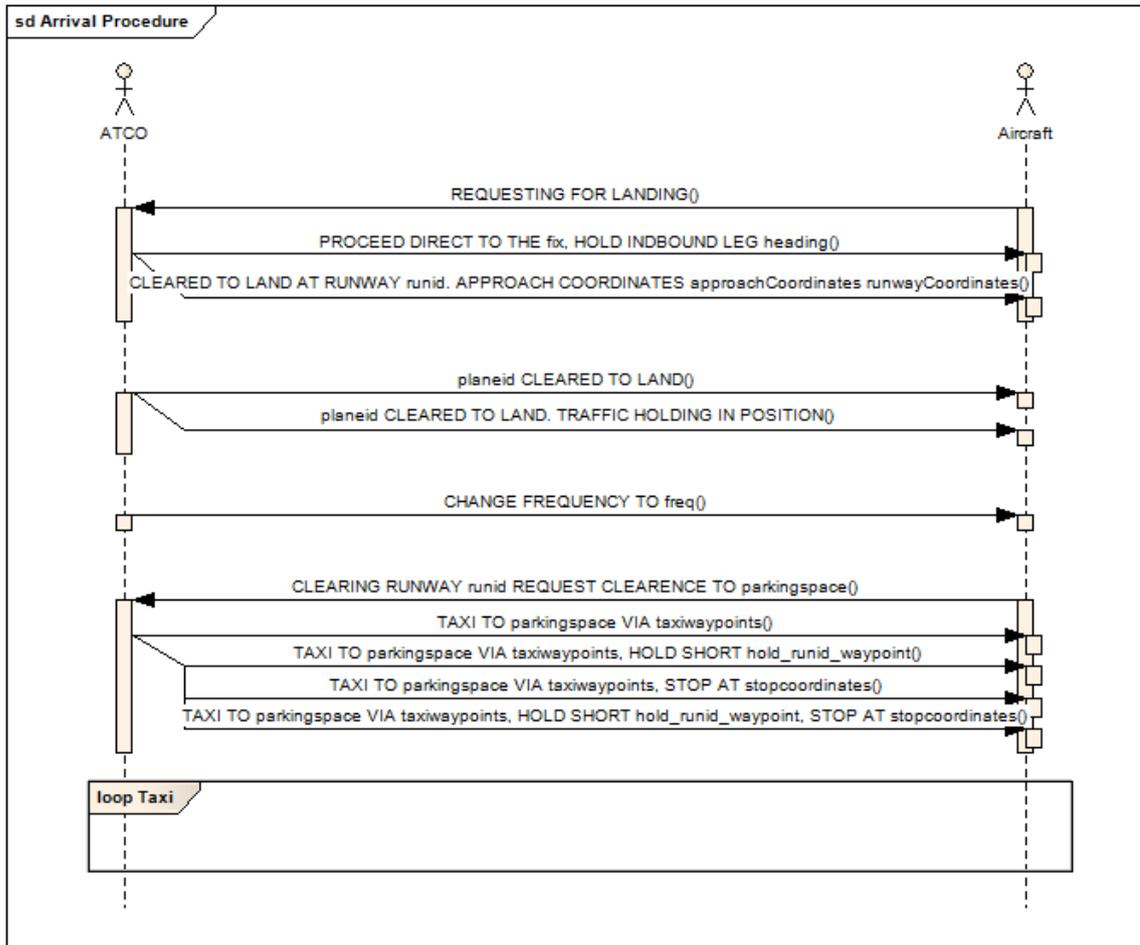


Recebida a informação dos pontos de entrada na *runway* a aeronave faz a sua entrada e posiciona-se, alinhada com a *runway*, no ponto *waypointhold*. Quando se encontra já posicionada comunica ao ATCO que já se encontra alinhado e preparado para levantar, indicando a *runway* em questão (*runid*) através da mensagem “HOLDING IN POSITION *runid*”. Por fim, quando todas as regras de segurança são garantidas concede a permissão de *takeoff* para a aeronave através da mensagem “CLEARED FOR TAKEOFF”. Com esta mensagem o protocolo de partida fica finalizado.

6.4.4 Protocolo de Chegada

O protocolo de chegada engloba as comunicações que acontecem desde o pedido de aterragem de uma aeronave até que esta chega ao terminal do aeroporto. A Figura 6.10 apresenta a sequência das mensagens que são trocadas durante o protocolo de chegada.

Figura 6.10: Diagrama de Sequência - Procedimento de Chegada



A mensagem inicial deste protocolo é o de pedido de aterrar no aeroporto respectivo que é feito através da mensagem “REQUESTING FOR LANDING”. Recebida esta mensagem, o ATCO, pode responder de duas formas diferentes consoante a possibilidade de a aeronave aterrar no aeroporto ou não. Se a aeronave não puder aterrar recebe a mensagem “PROCEED DIRECT TO THE *fix*, HOLD INDBOUND LEG *heading*” que indica à aeronave que deverá efectuar a manobra de *hold pattern*. Nesta mensagem é indicado um ponto de referência (*fix*) do local onde deverá ser efectuada e ainda a direcção de uma das arestas dessa trajectória (*heading*). No caso de a aeronave poder aterrar no aeroporto (quer seja em resposta ao pedido ou se já estiver em espera num *hold pattern* e agora já for possível aterrar) recebe a mensagem “CLEARED TO LAND AT RUNWAY *runid*. APPROACH COORDINATES *approachCoordinates runwayCoordinates*”. Nesta mensagem é indicada a *runway* a ser utilizada através de *runid* e dois conjuntos de pontos de referência para efectuar a aterragem. O conjunto *approachCoordinates* são pontos de referência para a aproximação à pista e consequente alinhamento enquanto que o conjunto

runwayCoordinates apresenta pontos de referência sobre a *runway*, por forma à aeronave manter-se alinhada com a *runway*.

Quando a aeronave fica a cerca de 5Km da *runway* a ser usada o ATCO faz uma nova comunicação confirmando a permissão para aterrar. Esta confirmação pode ser efectuada com duas mensagens, apenas com “*planeid* CLEARED TO LAND” ou com “*planeid* CLEARED TO LAND. TRAFFIC HOLDING IN POSITION”. A mensagem simples indica que pode continuar com a aproximação à *runway* sem nenhuma restrição, no caso da segunda mensagem essa aproximação pode na mesma ser efectuada e informa ainda que existe pelo menos uma aeronave no aeroporto que aguarda ordens para cruzar a *runway* em questão. Actualmente esta mensagem é apenas informativa para o piloto da aeronave não se assustar com a presença de uma aeronave junta da *runway* onde vai aterrar. Foi decidido manter essa informação presente neste protocolo por questões de semelhança.

Assim que a aeronave aterra na *runway* o ATCO comunica à aeronave a nova frequência para onde deverão ser efectuadas as comunicações posteriores. A mensagem utilizada para o efeito é “CHANGE FREQUENCY TO *freq*” onde *freq* indica a nova frequência. Já com a nova frequência a aeronave faz o pedido de sair da *runway* (*runid*) para o terminal com a indicação do *parkingspace*. A mensagem usada para o efeito é a seguinte: “CLEARING RUNWAY *runid* REQUEST CLEARANCE TO *parkingspace*”.

Em resposta ao pedido de abandonar a *runway* para o terminal, o ATCO pode enviar essa permissão através da mensagem “TAXI TO *parkingspace* VIA *taxiwaypoints*” que indica o parque para onde se desloca (*parkingspace*) e a sequência de pontos de referência até ao destino (*taxiwaypoints*). No entanto, e em semelhança com o protocolo anterior, o ATCO pode complementar esta informação com a indicação de pontos de paragem em situações de cruzamentos com outras *runways* (“... , HOLD SHORT *hold_runid_waypoint*”), pontos de paragem para evitar colisões com outras aeronaves (“... , STOP AT *stopcoordinates*”), ou ainda com a junção destas duas informações complementando a mensagem inicial com “... , HOLD SHORT *hold_runid_waypoint*, STOP AT *stopcoordinates*”.

Recebido o percurso necessário para a aeronave se deslocar desde a *runway* até ao parque atribuído dá-se início ao **Protocolo de Taxi**, apresentado na secção 6.4.2. A mensagem “END TAXIING” é enviada quando a aeronave chega ao final do seu percurso de taxi, que neste caso coincide com a chegada da mesma ao terminal/*parking space*. Esta mensagem dita também o final de ambos os protocolos (taxi e de chegada).

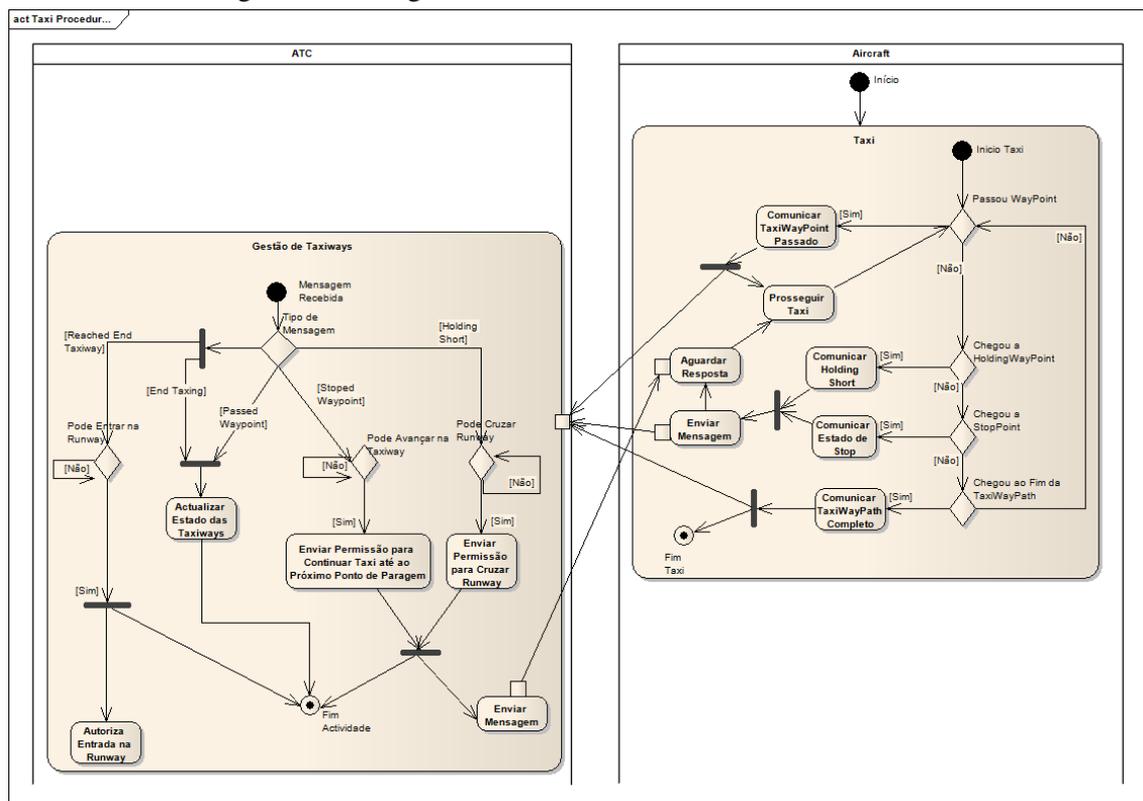
6.5 Procedimentos dos Protocolos

Nesta secção serão apresentadas as diversas acções a serem desempenhadas pelo ATCO e pelas aeronaves referentes aos protocolos enunciados na secção anterior.

6.5.1 Procedimento de Taxi

À semelhança dos protocolos das mensagens as acções de taxi são também as mesmas quer na manobra de partida ou de chegada, por essa forma as acções que dizem respeito a operações de taxi são aqui apresentadas em separado. A Figura 6.11 apresenta as acções que são necessárias de executar para efectuar taxi.

Figura 6.11: Diagrama de Actividades - Procedimento de Taxi



Quando a aeronave se encontra a efectuar taxi no aeroporto existem vários tipos de pontos de controlo: mudanças de direcção de uma *taxiway*; cruzamentos que envolvem *taxiways* com *runways*; cruzamentos que envolvem apenas *taxiways*; fim do percurso de taxi. Do lado do processamento da aeronave, conforme o tipo de ponto de controlo que for passado é executada uma acção distinta.

Se o ponto de controlo representar apenas uma mudança de direcção ou um cruzamento entre duas ou mais *taxiways* a aeronave executa a acção de “Comunicar TaxiWay-Point Passado” para o ATCO e pode “Proseguir Taxi”. No caso de o ponto de controlo ser um cruzamento com uma *runway* ou um ponto de paragem numa secção (para evitar colisões com outras aeronaves) a aeronave encarrega-se de “Enviar Mensagem” para o

ATCO a informar que se encontra parada e a fica a “Aguardar Resposta” com novas instruções a serem tomadas. Assim que recebe a resposta, pode “Prosseguir Taxi” até ao próximo ponto de controlo. Por fim, se o ponto de controlo for o de chegar ao fim do seu percurso executa a acção de “Comunicar TaxiWayPath Completo”, terminando desta forma o protocolo de taxi.

Da parte do ATCO dependendo da mensagem recebida executa acções diferentes. Se a mensagem recebida for uma referência a um cruzamento com uma *runway* o ATCO antes de enviar qualquer resposta analisa o estado actual da mesma, verificando se existe alguma aeronave a utilizá-la. Para considerar que, neste caso, a *runway* está ocupada basta haver alguma aeronave na fase de aproximação à *runway* ou se estiver sobre a *runway*, quer seja à espera de *takeoff* ou a aterrar. Se a *runway* estiver livre o ATCO executa a acção de “Enviar Permissão para Cruzar *Runway*”.

No caso de a mensagem indicar que a aeronave efectuou paragem numa secção de *taxiway* (para evitar colisão com outras aeronaves) verifica se essa possível colisão ainda permanece. Apenas quando é garantido que já não existem colisões eminentes o ATCO fica de “Enviar Permissão para Continuar Taxi até ao Próximo Ponto de Paragem” para a aeronave em causa. O cálculo do próximo ponto de paragem pode ser analisado em pormenor na secção 6.5.1.1.

Quando a mensagem recebida informa que a aeronave passou por um cruzamento entre *taxiways* ou apenas foi uma mudança de direcção, ou seja, a aeronave trocou de secção de *taxiways* o ATCO apenas tem de “Actualizar Estado das *Taxiways*”. Esta acção consiste em retirar a relação existente entre a aeronave e a secção que se encontra a abandonar (indicador de que estava a usar essa secção, e que o seu percurso já não volta a passar por essa secção) e actualizar o estado da nova secção, indicando que a aeronave se encontra a utilizá-la a partir deste momento. Este é um passo bastante importante para a gestão do tráfego pois é com estas actualizações que uma determinada secção passa a estar livre ou ocupada para outra aeronave poder usá-la.

O último tipo de mensagem que pode receber é a comunicação de que a aeronave chegou ao fim do seu caminho de *taxiway* (chegando ao terminal/*parking space* ou à entrada da *runway*). No caso da aeronave tiver chegado ao terminal, à semelhança da mensagem anterior apenas necessita de “Actualizar Estado das *Taxiways*” sendo que neste caso a aeronave não entra em nenhuma nova secção. No caso de a aeronave tiver chegado à entrada da *runway* que vai usar para o *takeoff* o ATCO verifica se a *runway* está livre para que a aeronave avance para a posição de *takeoff*. Para esta manobra ser efectuada é necessário garantir que nenhuma outra aeronave já se encontra a entrar na *runway*, já se encontra a aguardar ordem de *takeoff* nessa mesma *runway*, já se encontra a efectuar o *takeoff* ou ainda se encontra a efectuar aproximação à *runway*. Quando todas estas verificações são garantidas o ATCO “Autoriza Entrada na *Runway*” da aeronave que enviou a mensagem. Em qualquer uma destas duas acções o protocolo de taxi fica concluído,

sendo que no primeiro caso o protocolo de chegada também finaliza, enquanto que no segundo caso continua o protocolo de partida com a fase de entrada na *runway*.

6.5.1.1 Algoritmo de Gestão do Tráfego

O método de gestão do tráfego que circula nas *taxiways* foi desenvolvido de forma a conceder permissões de circulação às aeronaves, sem que estas necessitem de processamento adicional do ambiente envolvente para evitar colisões. Ou seja, quando é fornecida à aeronave uma instrução que permite efectuar taxi, esta pode executar essa manobra até ao primeiro ponto de paragem (cruzamento com uma *runway* ou *stop point*), sem perigo de colisões. Foi utilizada esta abordagem, por não existir um método, da parte da aeronave, que em situações onde duas aeronaves tivessem o mesmo trajecto, por exemplo, a segunda aeronave mantivesse uma distância de segurança com a primeira aeronave, dentro da mesma secção. Um outro exemplo é nos casos em que as trajectórias se sobreponham num cruzamento de *taxiways* e ambas as aeronaves chegassem a essa intercepção ao mesmo tempo. Com a utilização deste método que funciona em processamento *a priori* essas situações já não correm o risco de acontecer.

A Figura 6.12 apresenta, em *pseudo-código*, o algoritmo utilizado para efectuar a gestão do tráfego que circula nas *taxiways* do aeroporto.

Figura 6.12: Pseudo-código do Algoritmo de Gestão das *Taxiways*

```

1 ClearSection = null
2 NextNode = posicao actual da aeronave
3 NextEdge = null
4
5 Repetir:
6     NextEdge = proxima secção do caminho
7
8     Se não existir NextEdge
9         RETURN: Tem caminho livre até ao final do percurso
10    Se NextNode ou NextEdge estão reservados
11        RETURN: Pode avançar até à última ClearSection
12
13    Se programações em NextEdge todas com o mesmo sentido
14        ClearSection = NextEdge
15    Senão,
16        Se ClearSection diferente de null
17            RETURN: Pode avançar até à última ClearSection
18
19    NextNode = proximo início de secção

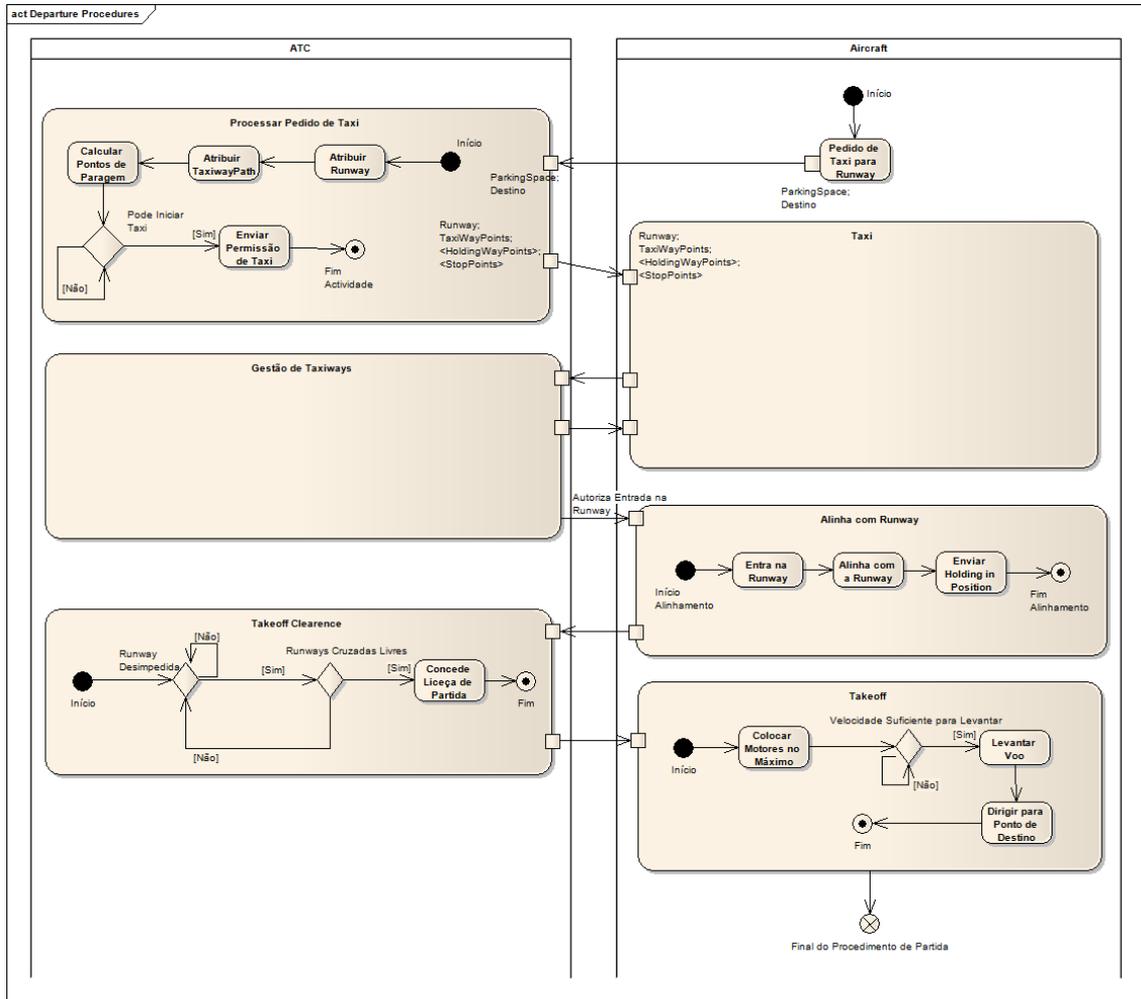
```

Em traços gerais, este algoritmo permite às aeronaves avançarem secções e nós do grafo (cruzamentos e mudanças de direcção) desde que estas não estejam reservadas ou a ser utilizadas. Por reservadas são entendidas as secções ou nós por onde uma aeronave tem permissões de passar até chegar ao ponto de *stop* definido aquando dessa permissão. As secções podem apresentar várias programações, ou seja, aeronaves que no seu trajecto passa por essa secção mas que ainda não tiveram permissão para usá-la. Quando apenas existem programações no mesmo sentido, esta é considerada como uma secção válida para ser atravessada pela aeronave em questão. Quando há programações em ambos os sentidos, o critério para permitir avançar essas secções concede avançar um conjunto seguido de secções com essas programações, desde que sejam todas consecutivas e nenhuma delas esteja ocupada ou reservada. Se houver alguma reservada ou ocupada não pode avançar para nenhuma destas secções, caso contrário pode atravessar este bloco de secções. Quando existem programações em sentidos diferentes numa secção nenhuma aeronave poderá parar nessas secções podendo ser tomadas duas acções, avançar até à secção livre anterior (caso exista) ou atravessar o bloco de secções nestas condições até à próxima secção livre, desde que as secções passadas não estejam ocupadas nem reservadas. Não é permitida a passagem por dois blocos de secções “concorridas” (por terem programações em ambos os sentidos) de uma só vez para não impedir que outras aeronaves que circulem no sentido inverso fiquem demasiado tempo à espera.

6.5.2 Procedimento de Partida

Nesta secção serão apresentadas as diversas acções a ser desempenhas durante o protocolo de partida. A Figura 6.13 apresenta sob a forma de um diagrama de actividades essas acções.

Figura 6.13: Diagrama de Actividades - Procedimento de Partida



A acção que desencadeia o protocolo de partida, como já referido, é o “Pedido de Taxi para *Runway*” juntamente com as coordenadas de destino pretendidas. Tendo o ATCO recebido este pedido desencadeia uma actividade com o objectivo de “Processar Pedido de Taxi” enviado. A primeira acção é “Atribuir *Runway*” para a aterragem da aeronave, neste processo é tido em conta a melhor trajectória (a partir da orientação da *runway*) para a direcção para o ponto de destino pretendido, assim como a intensidade do vento que se faz sentir sobre o aeroporto. No que diz respeito ao vento é importante salientar que não é de todo aconselhável a utilização de um sentido de *runway* em que o vento esteja a favor da trajectória da aeronave assim como se for perpendicular. No primeiro caso (mesmo sentido) diminui o impacto de vento nas asas do avião, obrigando a ser atingida uma velocidade superior ao normal para possuir impulso suficiente para levantar a aeronave. No segundo caso (perpendicular), se a intensidade for elevada pode causar um desvio na

rota, mesmo em terra, podendo no extremo provocar uma saída de pista.

A acção seguinte consiste em definir e “Atribuir TaxiwayPath” que permita fazer a ligação entre o parque onde a aeronave se encontra e a entrada para a *runway* a ser utilizada, seguida da introdução dos pontos de paragem necessários (*holding points* se existirem cruzamentos com *runways* e *stop points* para evitar colisões com outras aeronaves). O método utilizado para efectuar o cálculo da necessidade de pontos de *stop* pode ser analisado em pormenor na secção 6.5.1.1. Após a execução destas acções e antes de comunicá-las à aeronave é verificada se a aeronave pode avançar, sendo que apenas neste caso o ATCO terá de “Enviar Permissão de Taxi” à aeronave. Após esta comunicação esta actividade fica concluída.

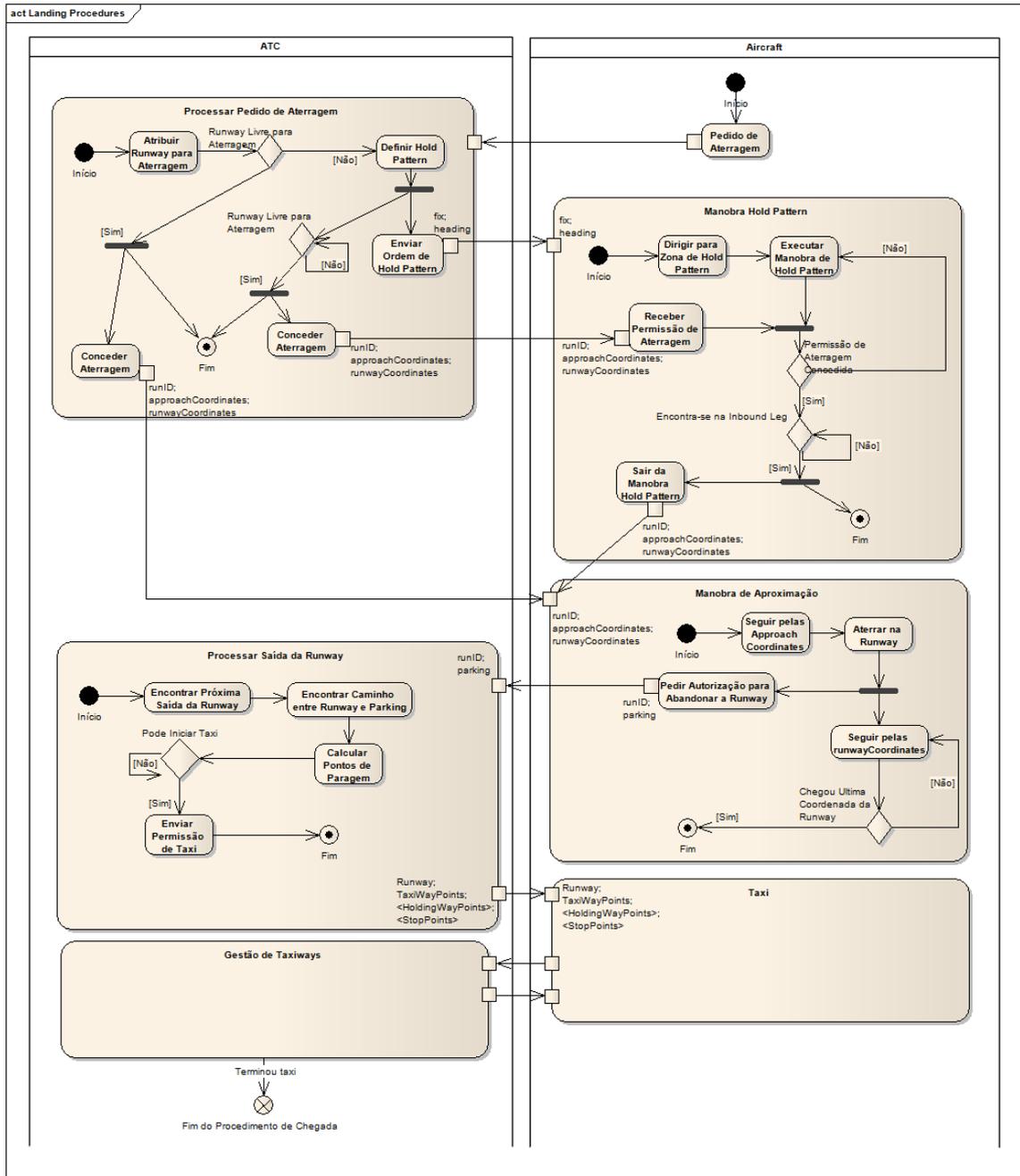
A actividade seguinte, para ambas as entidades (ATCO e aeronave), corresponde ao protocolo de taxi já apresentado na secção anterior (6.5.1), terminando quando o ATCO “Autoriza Entrada na *Runway*” à aeronave. Com esta autorização dá-se início à próxima actividade da aeronave, “Alinhar com *Runway*”. No primeiro passo a aeronave “Entra na *Runway*”, em direcção ao *runwaywaypoint* seguido do *waypointhold* apresentados na Figura 6.9. Para finalizar a actividade de alinhamento a aeronave, assim que estiver parada e alinhada com a *runway*, executa a acção de “Enviar Holding in Position” para o ATCO e aguardando a sua permissão para o efeito.

A actividade seguinte (“Takeoff Clearance”) é da responsabilidade do ATCO, que tem como objecto conceder a permissão de *takeoff* quando todas as condições de segurança para o efeito estão asseguradas. Para isso a primeira acção a ser verificada é a de que a própria *runway* está desimpedida, ou seja, não há mais nenhuma aeronave a efectuar a partida ou a aterrar na mesma *runway*. Quando não existe cruzamento de outras *runways* esta validação é suficiente, porém quando existe um ou mais cruzamentos é também necessário verificar se nessas *runways* não há nenhuma aeronave nas mesmas condições. Quando são ambas as condições validadas o ATCO “Concede Lixeira de Partida” à aeronave, que inicia o “Takeoff”. Para esta actividade a aeronave tem de “Colocar Motores no Máximo” e espera por uma velocidade suficiente para “Levantar Voo”. Após ter levantado da pista altera a sua direcção, se necessário, para se “Dirigir para Ponto de Destino”, terminando desta forma as acções relativas ao protocolo de partida.

6.5.3 Procedimento de Chegada

Nesta secção serão apresentadas as diversas acções a ser desempenhas durante o protocolo de chegada, começando pelo diagrama de actividades dessas acções (Figura 6.14).

Figura 6.14: Diagrama de Actividades - Procedimento de Chegada



A acção que inicia o protocolo de chegada, à semelhança do protocolo de partida, é o “Pedido de Aterragem” por parte da aeronave. Efectuado este pedido as acções passam para o lado do ATCO que fica encarregue da actividade de “Processar Pedido de Aterragem”. Nesta actividade, o ATCO, começa por “Atribuir *Runway* para Aterragem”, tendo novamente em conta a orientação da *runway* face à direcção da trajectória entre a

posição da aeronave e a entrada na *runway*. Um outro factor que também é tido em conta é a intensidade e direcção do vento. O passo seguinte consiste em verificar se a *runway* escolhida está livre para aterragem, para isso não pode haver nenhuma aeronave a efectuar aproximação ou mesmo já a aterrar assim como não pode haver nenhuma aeronave no processo inverso, ou seja, a entrar ou já colocada na *runway* ou já a levantar voo. No caso em que a *runway* esteja disponível para a aterragem o ATCO pode “Conceder Aterragem” terminando esta actividade e iniciando a actividade para a aeronave efectuar a “Manobra de Aproximação”.

No caso em que a *runway* esteja ocupada o procedimento do ATCO consistem em “Definir Hold Pattern” e “Enviar Ordem de Hold Pattern” para a aeronave. Nesta instrução é indicado um ponto de referência do local onde a aeronave deverá executar a “Manobra Hold Pattern”, juntamente com a respectiva orientação. Após o envio desta instrução, o ATCO, analisa periodicamente a situação da *runway* verificando se esta já se encontra livre para efectuar a aterragem. Quando esta já possibilitar a aterragem o ATCO já pode “Conceder Aterragem” à aeronave, terminando esta actividade e fazendo com que a aeronave abandone o *hold pattern*.

Para a “Manobra Hold Pattern” a primeira acção da aeronave é ela se “Dirigir para Zona de Hold Pattern” e começar a “Executar Manobra de Hold Pattern”. Esta manobra é explicada em maior detalhe na secção 6.5.3.1, mais à frente. A aeronave fica a executar esta manobra até “Receber Permissão de Aterragem”. Quando recebe permissão para aterrar, continua a executar o *hold pattern* até que esteja situada na parte “Inbound Leg” da manobra. Nesta situação a aeronave já pode “Sair da Manobra Hold Pattern” ficando já alinhada com a orientação da *runway* que vai usar. Assim que esta manobra é interrompida é terminada esta actividade, transitando imediatamente para a “Manobra de Aproximação”.

A “Manobra de Aproximação” consiste em fazer a aterragem da aeronave na *runway* que lhe foi destinada para o efeito. Em primeiro lugar a aeronave deverá “Seguir pelas Approach Coordinates” e “Aterrar na *Runway*”. Para estas acções quer a altitude e a velocidade da aeronave são reduzidas progressivamente até que esteja em condições para aterrar na *runway*. Quando efectivamente aterra na *runway* a aeronave encarrega-se de “Pedir Autorização para Abandonar a *Runway*” ao ATCO. Enquanto aguarda as permissão para abandonar a *runway* continua a “Seguir pelas *runwayCoordinates*” até atingir a última coordenada, terminando desta forma esta actividade. No entanto, se receber permissão para abandonar a *runway*, antes de passar por todos os pontos definidos nas *runwayCoordinates* estes são ignorados e substituídos pelos pontos de *taxiway* recebidos juntamente com a permissão.

O ATCO, para “Processar Saída da *Runway*” começa por “Encontrar Próxima Saída da *Runway*”, à qual se segue a acção de “Encontrar Caminho entre *Runway* e Parking”. Novamente, à semelhança do protocolo anterior, encarrega-se de “Calcular Pontos de

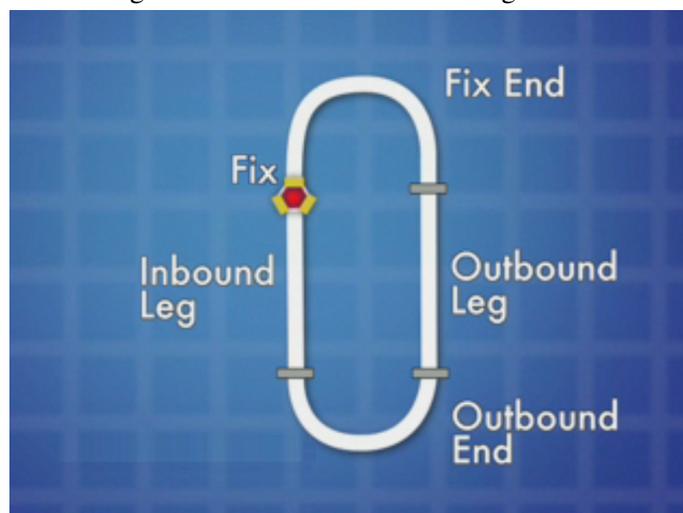
Paragem” na trajectória de taxi, quer sejam pontos de paragem se existirem cruzamentos com *runways* (*holding points*) ou pontos de paragem em secções de *taxiways* para evitar colisões com outras aeronaves (*stop points*). O método utilizado para efectuar o cálculo da necessidade de pontos de *stop* pode ser analisado em pormenor na secção 6.5.1.1. Após o cálculo do caminho de *taxiways* que liga a *runway* actual com o *parking space*, o ATCO finaliza esta actividade ao “Enviar Permissão de Taxi” para a aeronave com toda esta informação.

As actividades seguintes, quer para o ATCO ou para a aeronave fazem parte do **Protocolo de Taxi** apresentado na secção 6.5.1. A última mensagem do protocolo de taxi e simultaneamente a última mensagem do protocolo de chegada é a informação de que a aeronave chegou ao fim do caminho de *taxiways*, parando no terminal/*parking space*.

6.5.3.1 Manobra Hold Pattern

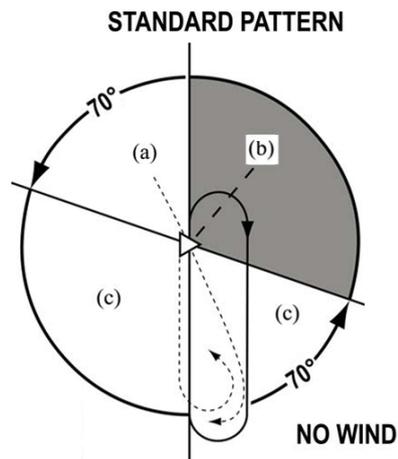
A manobra de *holding pattern* consiste numa manobra da aeronave com o objectivo de ficar a aguardar uma permissão para poder aterrar. Existem dois tipos desta manobra, a “standard” e a “não standard”. A diferença entre os dois é apenas na orientação em que é feita a manobra (sentido do ponteiro dos relógios ou contrário). Nesta secção é apresentada a manobra “standard” que foi a utilizada neste projecto. Esta manobra é efectuada a uma determinada altura constante situada e marcada sempre por um ponto de referência estático. Este ponto, denominado de “Fix” é um ponto facilmente identificável, a olho nu, pelo piloto da aeronave (VOR, DMI, etc) ou uma coordenada no espaço. A Figura 6.15 mostra a forma do *pattern* e as respectivas componentes que o formam (“Inbound Leg”, “Fix End”, “Outbound Leg” e “Outbound End”). [38]

Figura 6.15: Forma de um Holding Pattern



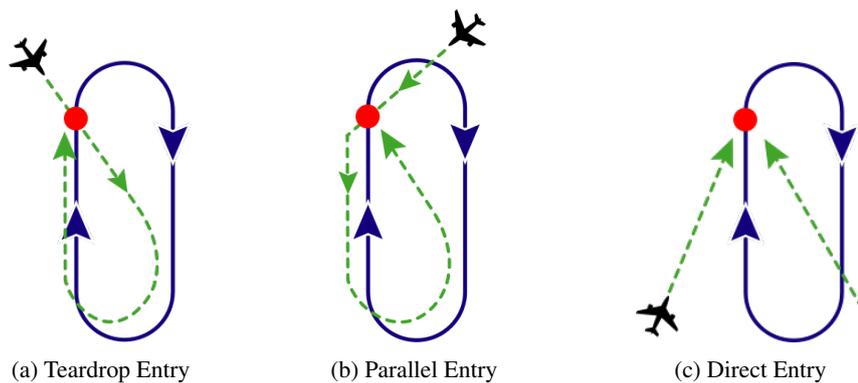
Para executar a manobra de *holding pattern*, dependendo da direcção com que a aeronave cruza o “Fix”, é necessário efectuar uma entrada adequada para melhor e mais rápido entrar no *pattern*. Considerando 0° como a orientação Norte (direcção desde a “Inbound Leg” em direcção ao “Fix” na Figura anterior (6.15)), a região identificada por **a)** corresponde a entradas entre as amplitudes entre 290° e 360° , a região **b)** entre os 0° e 110° e por fim a região **c)** vai desde os 110° até 290° , como apresentado na Figura 6.16.

Figura 6.16: Distribuição das Possíveis Entradas no Hold Pattern



A Figura 6.17 apresenta de uma forma simplificada a trajectória tomada pelas aeronaves em cada um dos tipos de entrada. Os tipos de entrada a), b) e c), representam o sector, da Figura anterior (6.16), pelo qual é feita a aproximação ao “Fix”.

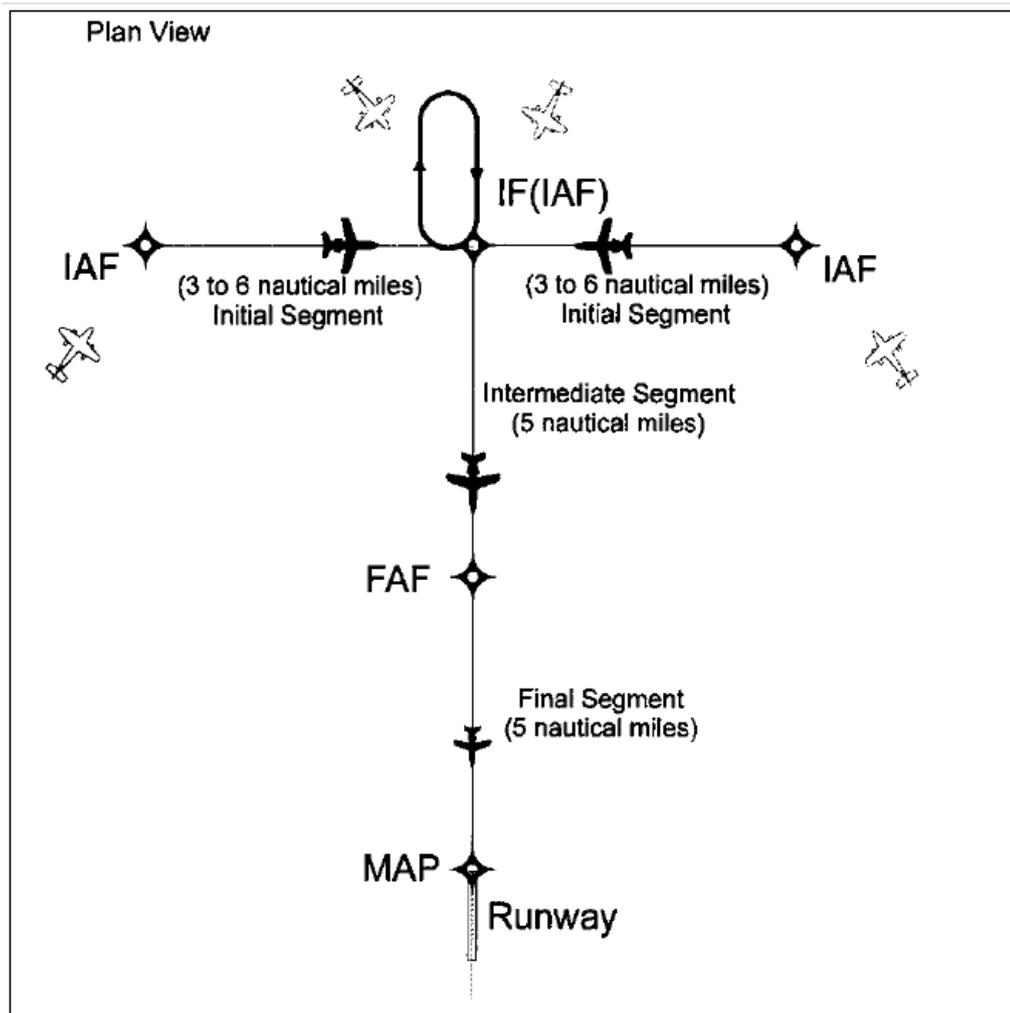
Figura 6.17: Tipos de Entrada para o Holding Pattern



Para a implementação da utilização do *holding pattern* na aplicação foi adoptada o “Basic ‘T’ Design”. Esta formação apresenta, como o próprio nome sugere, a forma de um **T**, com a *runway* na base, o “Fix” no topo e outros dois pontos (que poderão ser usados para outros *patterns*) nos extremos. A distância, recomendada, entre a *runway* e o

“Fix” é de 10NM (Milhas Náuticas - “Nautical Miles”, aproximadamente 18.2Km). Entre os diferentes *patterns* a distância recomendada é entre 3NM e 6NM (aproximadamente 5.5Km e 11.1Km, respectivamente). A Figura 6.18 apresenta o esquema desta estrutura em forma de T.

Figura 6.18: aaaaaa



6.6 Utilização do Sistema

Nesta secção serão apresentadas as funcionalidades disponibilizadas pela aplicação e o tipo de informação que é gerado pela aplicação.

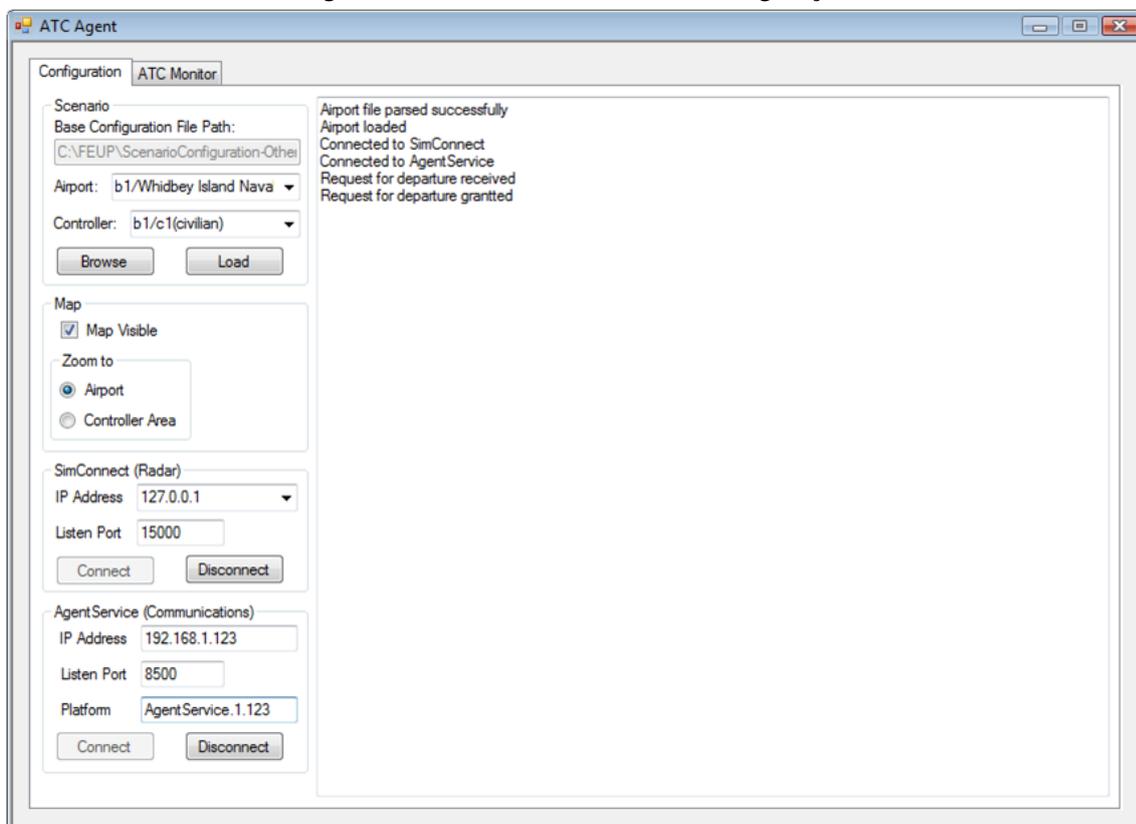
6.6.1 Inicialização

A aplicação desenvolvida que permite efectuar a gestão do tráfego aéreo pode ser inicializada de duas formas diferentes, com ou sem parâmetros de entrada. Os parâmetros

Detalhes de Implementação

que a aplicação aceita são a definição do aeroporto, do agente controlador e o AgentService pretendidos para a simulação. Se a informação fornecida estiver correcta os campos de configuração respectivos do sistema de simulação serão preenchidos automaticamente. Para iniciar a aplicação com parâmetros é utilizado o mesmo módulo usado para efectuar a sua configuração (“Control Panel”). Efectuada a configuração pretendida e pressionando o botão “Launch” (ver Figura 6.1) a aplicação “ATCAgent” é iniciada e apresenta os campos respectivos já preenchidos. Caso a aplicação “ATCAgent” seja iniciada separadamente os campos de configuração aparecerão vazios ou com informação definida previamente. O ecrã de configuração da aplicação é apresentado na Figura 6.19.

Figura 6.19: Interface - Janela de Configuração



As configurações do sistema estão divididas em três grupos, existindo um grupo adicional sobre o modo de visualização. O primeiro grupo é referente ao cenário (“Scenario”) onde será executada a simulação, ou seja, é responsável pela escolha do aeroporto que será usado para a simulação e do agente controlador que fará a gestão do mesmo. Para a pesquisa do ficheiro (criado através do módulo “Control Panel”) que contém a configuração do cenário é feita através do botão **Browse**. Após a selecção do ficheiro este é processado para sua validação (verificando se não existe nenhuma má construção no

ficheiro). Se o ficheiro for correctamente validado são apresentados nas duas *combo-box* deste grupo (“Airport” e “Controller”) todos os aeroportos e agentes controladores que se encontram definidos no ficheiro. Após escolha destes dois elementos que serão usados na simulação, os dados respectivos (constituição do aeroporto e área a monitorizar pelo controlador) podem ser carregados para o sistema através do botão **Load**.

O grupo que é apresentado logo a seguir (“Map”), não se trata de uma configuração explícita, mas simplesmente uma facilidade na interpretação dos dados carregados pelo cenário. Neste grupo é possível definir se se quer utilizar o mapa para a monitorização, através da *check-box* **Map Visible**. Este grupo possibilita ainda efectuar um ajuste de zoom sobre o mapa através de dois *radio buttons*. Com estes botões é possível colocar o mapa centrado e com zoom apropriado para a melhor visualização da constituição do aeroporto (**Airport**) ou a área monitorizada pelo agente (**Controller Area**).

O próximo grupo de configuração (“SimConnect (Radar)”) permite estabelecer a ligação entre a aplicação e a plataforma de simulação (FSX) intermediada pelo SimConnect. Como o simulador não necessita de estar a ser executado na mesma máquina onde se pretende executar esta aplicação torna-se necessário indicar o **IP Address** e a respectiva **Listen Port** da localização da máquina que contém o simulador. A lista de IPs possíveis encontra-se definida no ficheiro “SimConnect.cfg” presente na área de documentos do computador que executa a aplicação “ATCAgent”. Este ficheiro é criado quando instalado o SimConnect e é responsável por permitir ligações com o FSX. Um exemplo do conteúdo deste ficheiro é apresentado na Figura 6.20. Os botões **Connect** e **Disconnect** permitem estabelecer ou terminar a ligação entre a aplicação e o SimConnect, respectivamente, sendo que apenas um dos dois se encontra activo num determinado momento, dependendo se já existe ou não ligação. Após a criação da ligação com o SimConnect é iniciado o efeito do radar, ou seja, são importadas para a aplicação as informações das aeronaves que circulem dentro do espaço aéreo abrangido pelo controlador. Estas aeronaves já são visíveis no mapa da monitorização a partir deste momento.

Figura 6.20: Exemplo do Ficheiro de Configuração do SimConnect

```

1  [SimConnect.0]
2  Protocol=Auto
3  Address=127.0.0.1
4
5  [SimConnect.1]
6  Protocol=Ipv4
7  Address=192.168.xxx.xxx
8  Port=8765
9
10 [SimConnect.2]
11 Protocol=Ipv4
12 Address=192.168.yyy.yyy
13 Port=8765

```

O último grupo de configurações (“AgentService (Communications)”), permite estabelecer a ligação entre a aplicação e a plataforma de comunicação (AgentService). À semelhança do FSX, o AgentService não necessita de estar a ser executado na mesma máquina que a aplicação “ATCAgent”, desta forma é apresentado novamente dois campos, **IP Address** e **Listen Port**, que definem o IP e a porta, respectivamente, da localização da máquina que se encontra a executar o AgentService. Para efectuar a ligação ao AgentService é ainda necessário mais um argumento referente ao nome da plataforma onde está situado o serviço, sendo definido no campo **Platform**. Os botões **Connect** e **Disconnect** permitem estabelecer ou terminar a ligação entre a aplicação e o AgentService, respectivamente, sendo que apenas um dos dois se encontra activo num determinado momento, dependendo se já existe ou não ligação. Quando esta ligação é estabelecida a aplicação fica à escuta de qualquer mensagem enviada por qualquer aeronave.

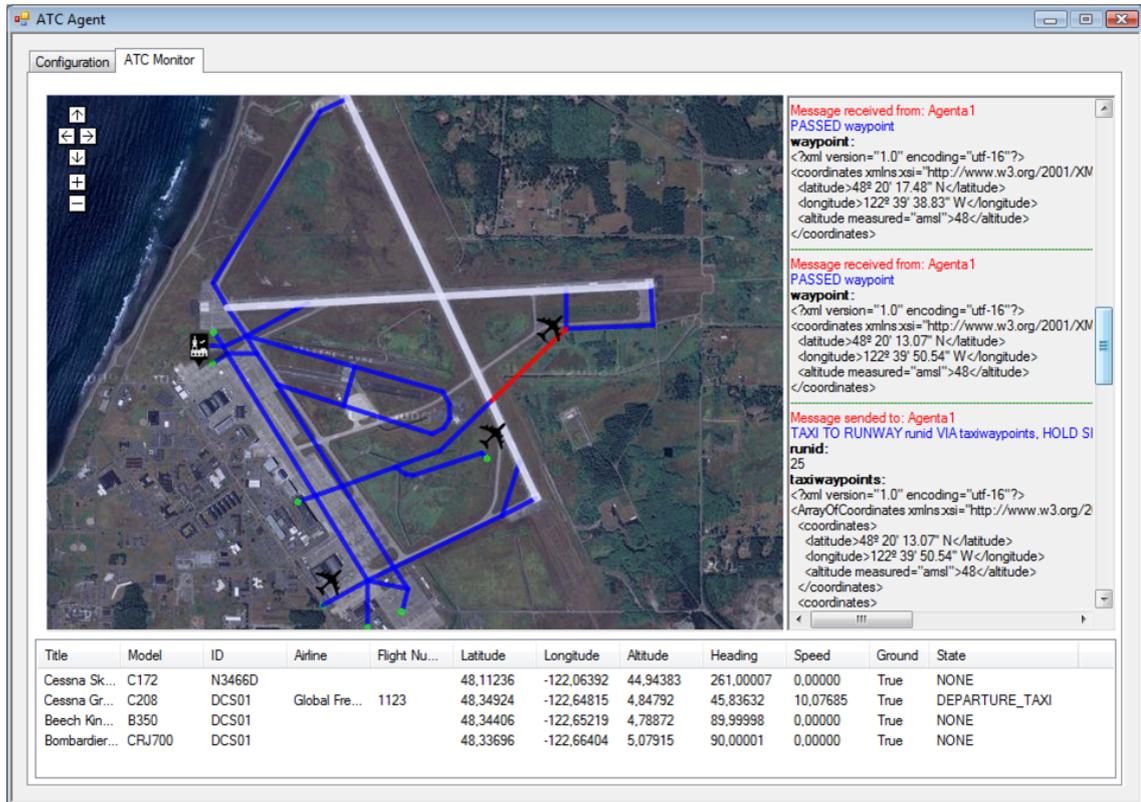
Neste ecrã inicial existe ainda uma área de texto onde são registadas todas as acções efectuadas pelo sistema. Estas acções são referentes às acções executadas desde as configurações do sistema até ao término do mesmo, momento em que todo o texto existente é guardado num ficheiro, fazendo um *log* (registo) do comportamento executado pelo sistema.

6.6.2 Monitorização

O ecrã de monitorização permite ao utilizador da aplicação ter uma visão geral dos comportamentos desempenhados pelo sistema. Este ecrã é constituído por três componentes: mapa, aeronaves detectadas pelo radar e ainda registo das mensagens enviadas/recebidas. A Figura 6.21 apresenta a janela de monitorização apresentada durante a simulação.

Detalhes de Implementação

Figura 6.21: Interface - Janela de Monitorização



A primeira e maior componente do ecrã é a visualização do estado das aeronaves e do aeroporto através de um mapa representado por uma vista aérea. Neste mapa são apresentadas as diversas aeronaves que circulam no espaço aéreo, representadas pelo símbolo do avião (✈). A torre de controlo é também assinalada com um símbolo especial (📡) indicando a localização do radar e do veículo do utilizador do FSX. São ainda representadas três componentes da estrutura do aeroporto, nomeadamente os *parking spaces* através de círculos verdes, as *taxiways* através de segmentos azuis e finalmente as *runways* através de segmentos brancos. No caso das *taxiways* estas podem alterar a sua cor, alternando entre o azul e o vermelho. Quando estão com a cor azul significa que essa secção se encontra livre, ao contrário de quando está vermelha que se apresenta a ser utilizada por uma aeronave. Na Figura 6.21 é possível confirmar esta situação pela presença do ícon de aeronave sobre a secção que está com a cor vermelha. De notar que, mesmo tendo definido no painel anterior o nível de zoom é na mesma possível de alterar o valor de zoom e a posição do mapa, através dos botões apresentados na parte superior esquerda do mapa ou arrastando o próprio mapa utilizando o cursor do rato.

Outra componente, que de certa forma está relacionada com o mapa, é apresentada na parte inferior do ecrã. Aqui são apresentadas todas as aeronaves que estão dentro do

Detalhes de Implementação

espaço monitorizado pelo controlador, incluindo as que são visíveis no mapa e as que estão fora dele. As informações são apresentadas sob a forma de uma tabela, das quais algumas são estáticas (que identificam a aeronave) e outras são dinâmicas (localizam a aeronave no espaço). Estes dados são actualizados periodicamente pelo SimConnect (neste caso foi definido um intervalo de dois segundos entre actualizações). Os campos apresentados na tabela são os seguintes:

- “Title” - Nome pelo qual é denominada a aeronave
- “Model” - Modelo identificativo da aeronave
- “ID” - Identificador da aeronave
- “Airline” - Companhia aérea
- “Flight Number” - Número de voo
- “Latitude” - Valor da latitude da posição da aeronave
- “Longitude” - Valor da longitude da posição da aeronave
- “Altitude” - Altitude a que se encontra a aeronave
- “Heading” - Direcção, em graus, que a aeronave está a tomar
- “Speed” - Velocidade da aeronave
- “Ground” - Indica se a aeronave está em terra ou a voar
- “State” - Estado actual da aeronave para o ATCO

Por fim a última componente do ecrã diz respeito às comunicações efectuadas entre o ATCO e as aeronaves. Em cada notificação de mensagem é apresentado em primeiro lugar o remetente da mensagem (no caso de ter sido uma mensagem enviada por uma aeronave) ou para quem se destina a mensagem (no caso de se tratar de uma mensagem enviada para uma aeronave). De seguida é apresentado o conteúdo da mensagem (apresentado na secção 6.4) seguido de todos os parâmetros relacionados com a mensagem. Para identificar os parâmetros é em primeiro lugar apresentado o identificador desse parâmetro (letras minúsculas do conteúdo da mensagem) seguido do valor desse parâmetro.

Capítulo 7

Casos de Teste

Para analisar o funcionamento do sistema desenvolvido foram efectuados testes ao desempenho do controlo de tráfego aéreo em aeroportos com características diferentes. Um dos aeroportos usados foi o “Friday Harbor Airport” (KFHR¹) que apenas apresenta uma única *runway*. Outro aeroporto que foi também utilizado foi o Whidbey Island Naval Air Station (KNUW²) que apresenta duas *runways* que se interceptam.

7.1 Testes efectuados

A estrutura do aeroporto KFHR é ilustrada na Figura 7.1, seguido de uma descrição sobre o tipo de testes efectuados sobre este aeroporto. As *taxiways* são representadas a azul, as *runways* a branco, os *parking spaces* a verde e a torre de controlo com o ícone de aeroporto.

¹<http://www.airnav.com/airport/KFHR>

²<http://www.airnav.com/airport/KNUW>

Figura 7.1: Friday Harbor Airport



Os testes efectuados sobre este aeroporto consistiram em avaliar a capacidade de resposta do sistema para simultâneos pedidos de partida. Deste modo, foram realizados dois tipos de casos de teste. O primeiro, consistiu em efectuar pedidos de partida utilizando apenas um dos sentidos da *runway*, enquanto que no outro tipo, ambos os sentidos da *runway* era utilizados. Para cada teste foram introduzidas dezasseis (16) aeronaves no aeroporto a efectuarem pedidos de partida, praticamente em simultâneo. O sistema foi capaz de conceder as dezasseis permissões de partida em cerca de vinte e dois minutos, a contar desde o primeiro pedido de partida até à última aeronave ter descolado da *runway*. Estes valores apontam para um intervalo de tempo entre partidas de aeronaves inferiores a um minuto e meio.

A estrutura do aeroporto KNUW que apresenta duas *runways* que se cruzam é ilustrado na Figura 7.2, onde as *taxiways* são representadas a azul, as *runways* a branco, os *parking spaces* a verde e a torre de controlo com o ícone de aeroporto.

Figura 7.2: Whidbey Island Naval Air Station



Neste aeroporto foram efectuados testes para analisar a capacidade de resposta do sistema a múltiplos pedidos de partida, chegada e ambos em simultâneo. Pelo facto do aeroporto possuir duas *runways*, e para obrigar o uso de ambas durante a simulação, foram definidos dois pontos de destino para as aeronaves. Cada ponto de destino relaciona-se com uma *runway* distinta, que proporciona uma melhor orientação de saída da *runway* para o ponto de destino. Para este estudo foram utilizadas vinte e quatro (24) aeronaves a fazer pedidos de partida ao agente controlador. O sistema foi capaz de atender a todos estes pedidos em aproximadamente cinquenta minutos, desde o primeiro pedido efectuado até à última aeronave sair do aeroporto. Desta forma, o sistema foi capaz de conceder, em média, uma partida a cada dois minutos. Comparativamente com o cenário anterior, do aeroporto KFHR, é notório um ligeiro aumento do intervalo de tempo entre *takeoffs*, justificado pela necessidade de garantir que as aeronaves não provoquem colisões quando se encontram a percorrer a *runway*.

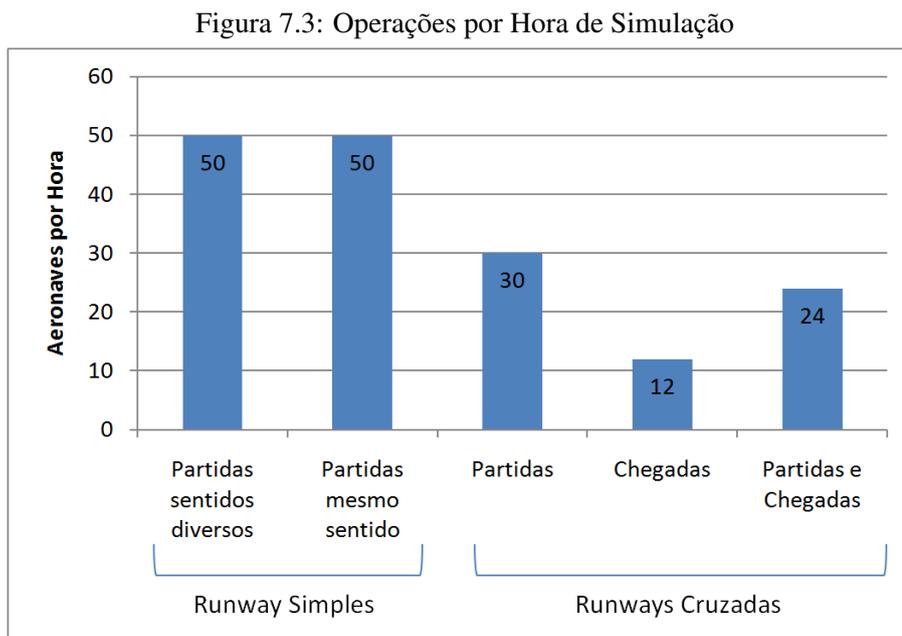
O teste seguinte consistiu em analisar o comportamento do sistema sobre múltiplos pedidos de aterragem para o aeroporto KNUW. Neste teste foram utilizadas dezasseis (16) aeronaves, que efectuaram pedidos de aterragem, praticamente em simultâneo. Por este

facto as aeronaves foram encaminhadas para diversos “*holding fix*” associados à *runway* atribuída, para efectuarem a manobra “*hold pattern*”. Neste cenário o sistema foi capaz de concluir todas as aterragens numa hora e vinte e cinco segundos. O intervalo médio entre cada permissão de aterragem foi inferior a cinco minutos, no entanto o intervalo entre cada aterragem da aeronave na *runway* (*touchdown*) é ligeiramente superior a cinco minutos (aproximadamente quize segundos). Este acontecimento é explicado pelo facto de quando o controlador concede a permissão para a aeronave aterrar, esta pode estar do lado da “*outbound leg*” ou do “*fix end*” do “*holding pattern*” (consultar capítulo 6.5.3.1), demorando mais ou menos tempo até chegar ao aeroporto, respectivamente, assim como a velocidade, relativamente baixa, de cada aeronave.

O último teste teve por objectivo avaliar o comportamento do sistema num cenário em que as aeronaves efectuavam pedidos de partida e de chegada. Neste cenário o sistema foi capaz de conceder doze permissões de partida (*takeoff*) e dez permissões para aterrar, em menos de uma hora de simulação. O intervalo médio entre cada permissão de partida foi de quatro minutos e quarenta e cinco segundos enquanto que o intervalo médio entre chegadas foi de cinco minutos e trinta segundos.

7.2 Comparação dos resultados

A Figura 7.3 apresenta um gráfico que relaciona o número de operações que o sistema concede durante uma hora de simulação com os diferentes testes efectuados.



Como pode ser constatado pelo gráfico, o número de permissões de partida para aeronaves num aeroporto apenas com uma simples *runway*, não é afectado pelo sentido da *runway* que é utilizado. Este acontecimento pode ser justificado pelo facto de não ter sido implementada uma componente temporal no sistema, sendo toda a gestão do tráfego efectuada apenas tendo em conta a componente espacial das aeronaves. Neste caso apenas é concedida permissão para entrada na *runway* quando a aeronave que a antecede levanta voo. No entanto, o valor obtido encontra-se dentro dos valores normais e praticados actualmente com aeroportos deste tipo (42 a 53 operações por hora) [6].

O resultado obtido no aeroporto KNUW (com duas *runways* cruzadas), no teste em que só eram efectuados pedidos de partida, foi de 30 permissões de partida durante uma hora de simulação. Face ao cenário anterior nota-se um decréscimo de operações que pode ser justificado por três razões. A primeira razão é, novamente, a não inclusão da componente temporal no sistema, que impede um menor intervalo de tempo entre as partidas. O segundo factor é a necessidade de cruzar uma das *runways* para poder chegar à outra. Por fim, os comprimentos das secções das *taxiways* são substancialmente superiores às do aeroporto KFHR.

Relativamente às chegadas, o número de operações por hora foi de apenas 12. Este facto deveu-se mais uma vez à não utilização da componente temporal no sistema pois, para evitar colisões entre aeronaves nas *runways* já após ou durante a manobra de aterragem, foi necessário garantir um intervalo entre as aeronaves ligeiramente superior ao praticado actualmente. Um outro factor foi o tempo de demora das aeronaves em abandonar a *runway* em questão, devido às grandes dimensões das mesmas assim como a velocidade da aeronave durante essa manobra. Este factor torna-se relevante pois só é concedida uma nova permissão de aterragem quando não existe nenhuma aeronave a utilizar a *runway* em questão.

No cenário, que englobou aterragens e partidas, o número de operações por hora situou-se entre os dois valores anteriores (30 nas partidas e 12 nas chegadas), tendo conseguido permitir a execução de vinte e quatro (24) operações. Este facto é explicado pela intercalação de partidas entre cada pedido de aterragem, possibilitando uma melhor utilização das *runways*, relativamente ao teste anterior. A razão por este valor ter sido inferior ao cenário em que apenas houve partidas justifica-se pelo tempo de demora provocado pelas permissões de aterragem, que após concedidas a uma aeronave até que esta aterre na *runway*, nenhuma outra aeronave lá pode entrar, cruzar ou aterrar.

Foi também constatado que quanto mais pequenas forem as secções das *taxiways*, maior é a eficiência do sistema. Isto acontece porque na implementação do sistema foi definido que, em cada secção de *taxiway*, apenas pode circular uma aeronave em cada instante. Por exemplo, numa *taxiway* com 1000 metros, se as secções desta forem de 200 metros, apenas cinco aeronaves podem circular na mesma *taxiway*, mas se as secções forem de apenas 100 metros já poderão circular dez aeronaves na mesma *taxiway*. A

Figura 7.4 apresenta o caso prático do aeroporto KFHR em que as secções de *taxiway* são de pequenas dimensões, permitindo um maior número de aeronaves em circulação, num determinado momento. Desta forma, como método de optimização do sistema podem ser utilizadas secções de *taxiways* mais pequenas.

Figura 7.4: Utilização das Taxiways pelas Aeronaves



Capítulo 8

Conclusões e Trabalho Futuro

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões deste trabalho e propostas de trabalho futuro no desenvolvimento deste tema, sobre o “Controlo Autónomo do Tráfego Aéreo”.

8.1 Conclusões

De ano para ano o tráfego aéreo a nível mundial, quer seja utilizado para transporte de passageiros ou de mercadorias, tem aumentado progressivamente. Este factor vem dificultar ainda mais a actividade dos controladores aéreos, que já hoje é bastante desgastante. Por esta razão torna-se fundamental a realização de estudos com o objectivo de tentar combater este rumo dos acontecimentos. Existem cada vez mais sistemas de auxílio aos controladores, tirando o máximo partido das novas tecnologias, quer para treinamento dos próprios controladores ou em aplicações práticas na gestão do tráfego aéreo.

Outra abordagem que também tem por objectivo melhorar o controlo do tráfego aéreo é a utilização de sistemas de apoio à decisão aos controladores ou até mesmo a automatização do controlo do tráfego. Vários autores, nos últimos anos, têm já contribuído com ideias e métodos práticos de gestão de aeronaves, nomeadamente para prevenção de colisões.

Para este trabalho, a abordagem escolhida, foi a de utilização de um sistema com recurso a agentes inteligentes para efectuar a gestão do tráfego aéreo, juntamente com um sistema também autónomo de gestão de aeronaves. A coordenação entre as actividades desempenhadas por ambos os tipos de agentes mostrou ser possível de ser implementada. A utilização de uma máquina de estados para a identificação da acção que está a ser desempenhada por uma aeronave mostrou também ser eficaz. Desta forma, dependendo do estado actual da aeronave, a quantidade de elementos necessários de serem processados nessa situação é diminuída, filtrando a informação excedente.

Os protocolos e respectivos procedimentos utilizados actualmente no controlo de tráfego aéreo mostraram ser possíveis de implementar num sistema automatizado, utilizando

agentes inteligentes. A interpretação de um aeroporto e consequente gestão do tráfego das aeronaves que circulem em terra, utilizando um grafo como estrutura de dados para armazenar as *taxiways* existentes mostrou ser eficaz com o sistema implementado. A divisão das *taxiways*, em secções de pequenas dimensões, mostra ser mais eficiente do que noutras situações possibilitando um “escoar” mais eficaz de todas as aeronaves do aeroporto, enquanto efectuem manobras de taxi.

Apesar de o sistema implementado, para efectuar a gestão do tráfego, apenas ter em conta a componente espacial das aeronaves, este mostrou ser capaz de efectuar uma gestão do tráfego aéreo dentro dos valores que actualmente são praticados nos aeroportos. Se for adicionado ao sistema a componente temporal para a gestão do tráfego, este poderá ter melhores resultados, permitindo efectuar mais operações num determinado intervalo de tempo.

Esta tese possibilitou algumas contribuições científicas para o controlo de tráfego aéreo automatizado. Foram coleccionadas várias ideias interessantes que podem ser aplicadas para este efeito assim como apresentadas algumas propostas novas. Uma outra contribuição científica foi lançada na forma de um artigo apresentado na CISTI 2010 [40].

Com este trabalho conclui-se que a utilização de um sistema multi-agente para o controlo autónomo do tráfego aéreo, na gestão de um aeroporto aparenta ser uma abordagem inteligente para combater o aumento de tráfego aéreo e consequente aumento de dificuldade na sua gestão, por parte dos controladores. A utilização de um sistema de controlo autónomo de tráfego aéreo, capaz de interpretar diferentes aeroportos (como a aplicação desenvolvida) aparenta ser também uma ferramenta útil na construção de novos aeroportos, podendo estes serem testados mesmo antes da sua construção.

8.2 Trabalho Futuro

Como trabalho futuro e de forma a completar o processo de gestão de tráfego aéreo, deveria ser feita a implementação da gestão dos aviões que circulam num espaço aéreo. Esta trabalho, com base no capítulo 4, toma já a iniciativa de diversos procedimentos que podem ser utilizados para o controlo das aeronaves nesta situação.

Tendo por base este sistema desenvolvido, que até agora é capaz de efectuar a gestão do tráfego aéreo em torno do aeroporto em simulação, diversos processos da implementação poderiam ser optimizados. A introdução da componente temporal para a gestão do tráfego é um bom ponto de partida para o efeito. A aplicação de esforços para a optimização deste tipo de sistemas é bastante importante para o futuro, segunda as previsões do aumento de tráfego aéreo.

Algum ajuste, por parte da arquitectura do sistema, de modo a possibilitar a utilização de *reflection*, permitindo dinamicamente aceitar novas instâncias de um determinado

Conclusões e Trabalho Futuro

tipo, poderia possibilitar a programação de diversos métodos para a gestão de tráfego aéreo e consequente utilização no sistema. Com esta funcionalidade esta aplicação poderia ser utilizada não apenas para testar configurações de um determinado aeroporto mas simultaneamente testar diversas novas formas de gestão do tráfego.

Um último ponto interessante seria a aplicação de um sistema semelhante (gestão autónoma do tráfego aéreo) em ambientes terrestres ou até mesmo marítimos.

Referências

- [1] STATFOR. Eurocontrol Long-Term Forecast: IFR Flight Movements 2008-2030, Edition Number 1. Technical Report DAS/DIA/STATFOR Doc302, Eurocontrol, 2008.
- [2] Daniel Castro Silva. Dynamic Agent Coordination for Applications in Surveillance and Search & Rescue Operations. Phd Thesis Proposal, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2008.
- [3] Federal Aviation Administration United States. Air Traffic Control. <http://www.faa.gov/documentLibrary/media/Order/ATC.pdf>, "acedido em Junho de 2010".
- [4] Kenneth Myers. Overview of Fatigue Mitigation Initiatives in the FAA Air Traffic Organizations. In *FAA Fatigue Management Symposium - Partnerships for Solutions*, Vienna, 18 de junho de 2008. Federal Aviation Administration.
- [5] Federal Aviation Administration United States. Facility Operation and Administration. <http://www.faa.gov/documentLibrary/media/Order/FAC.pdf>, 2009.
- [6] NASA Ames Education Division. Airport Design. http://virtualskies.arc.nasa.gov/airport_design/index.html, "acedido em Junho de 2010".
- [7] Michael Oxner. Airport Layouts. <http://bathursted.ccnb.nb.ca/vatcan/fir/moncton/WeeklyTopics/Archives/20030921/CurrentTopic.html#Taxiways>, "acedido em Junho de 2010".
- [8] NASA Ames Education Division. Air Traffic Management. <http://virtualskies.arc.nasa.gov/atm/index.html>, "acedido em Junho de 2010".
- [9] NASA Ames Education Division. Navigation. <http://virtualskies.arc.nasa.gov/navigation/index.html>, "acedido em Junho de 2010".
- [10] Federal Aviation Administration United States. What we do. <http://www.faa.gov/about/mission/activities/>, "acedido em Junho de 2010".
- [11] SESAR Consortium. SESAR Master Plan D5. Technical Report DLM-0710-001-02-00, EUROCONTROL, Abril de 2008.

REFERÊNCIAS

- [12] PMO and FPSG. Creating the Functional Airspace Block Europe Central. Technical Report FABEC_FSR_V 2.0, EUROCONTROL, Setembro de 2008.
- [13] Airport-Technology. Air Traffic Management and Control Systems (ATM / ATC). <http://www.airport-technology.com/contractors/traffic/>, "acedido em Junho de 2010".
- [14] Todd J. Callantine. CATS-based Air Traffic Controller Agents. Technical Report NASA/CR-2002-211856, NASA Ames Research, Outubro de 2002.
- [15] Henry Hexmoor and Tim Heng. Air Traffic Control and Alert Agent. In *AGENTS '00: Proceedings of the fourth international conference on Autonomous agents*, pages 237–238, Barcelona, Spain, 2000.
- [16] Michal Pěchouček, David Šišlák, Dušan Pavlíček, and Miroslav Uller. Autonomous Agents for Air-Traffic Deconfliction. In *AAMAS '06: Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 1498–1505, Hakodate, Japan, 2006.
- [17] Vladimir Gorodetsky, Oleg Karsaev, Vladimir Kupin, and Vladimir Samoilov. Agent-Based Air Traffic Control in Airport Airspace. In *IAT '07: Proceedings of the 2007 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology*, pages 81–84, 2007.
- [18] *Fourth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, 2001*, Santa Fe, NM, USA, acedido em Junho de 2010. <http://atmseminar.eurocontrol.fr/>.
- [19] Jimmy Krozel, Mark Peters, Karl D. Bilimoria, Changkil Lee, , and Joseph S.B. Mitchell. System Performance Characteristics of Centralized and Decentralized Air Traffic Separation Strategies. In *Fourth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*, Santa Fe, NM, USA, 2001.
- [20] Yi jen Chiang, James T. Klosowski, Changkil Lee, and Joseph S. B. Mitchell. Geometric Algorithms for Conflict Detection/Resolution in Air Traffic Management. In *In 36th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 1835–1840, San Diego, California USA, 1997.
- [21] Jimmy Krozel and Mark Peters. Strategic Conflict Detection and Resolution for Free Flight. In *In 36th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 1822–1828, San Diego, California USA, 1997.
- [22] Jared C. Hill, F. Ryan Johnson, James K. Archibald, Richard L. Frost, and Wynn C. Stirling. A Cooperative Multi-Agent Approach to Free Flight. In *AAMAS '05: Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 1083–1090, Netherlands, 2005.
- [23] Kagan Tumer and Adrian Agogino. Distributed Agent-Based Air Traffic Flow Management. In *AAMAS '07: Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 1–8, Honolulu, Hawaii, 2007.

REFERÊNCIAS

- [24] Vladimir Gorodetsky, Oleg Karsaev, Vladimir Samoylov, and Victor Skormin. Multi-Agent Technology for Air Traffic Control and Incident Management in Airport Airspace. In *Proceedings of AAMAS International Workshop Agents in Traffic and Transportation*, pages 118–125, Lisboa, Portugal, 2008.
- [25] Adrian Agogino and Kagan Tumer. Improving Air Traffic Management Through Agent Suggestions. In *AAMAS '09: Proceedings of The 8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, pages 1271–1272, Budapest, Hungary, 2009.
- [26] Jiří Samek, David Šišlák, Přemysl Volf, and Michal Pěchouček. Multi-Party Collision Avoidance among Unmanned Aerial Vehicles. In *IAT '07: Proceedings of the 2007 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology*, pages 403–406, Budapest, Hungary, 2007.
- [27] Microsoft. Microsoft Flight Simulator X. <http://www.microsoft.com/games/flightsimulatorx/default.htm>, "acedido em Junho de 2010".
- [28] Microsoft. ESP SDK Overview. <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/cc526948.aspx>, "acedido em Junho de 2010".
- [29] Reality XP. What is Microsoft®ESP™? <http://www.reality-xp.com/professional/esp/index.html>, "acedido em Junho de 2010".
- [30] Microsoft. About SimConnect. <http://msdn.microsoft.com/en-us/esp/cc835021.aspx>, "acedido em Junho de 2010".
- [31] Microsoft. SimConnect SDK Reference. <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/cc526983.aspx>, "acedido em Junho de 2010".
- [32] Christian Vecchiola, Alberto Grosso, and Antonio Bocalatte. AgentService: a Framework to Develop Distributed Multiagent Systems. *International Journal of Agent-Oriented Software Engineering*, 2(3):290–323, Julho 2008.
- [33] FIPA. FIPA Agent Management Specification. Standard Component SC00023K, Foundation for Intelligent Physical Agents, 2, rue Bellot CH-1206 Geneve, Switzerland, March 2004.
- [34] I.i.d.o. AgentService. <http://www.agent-service.it/>, "acedido em Junho de 2010".
- [35] Google. Google Maps API Family. <http://code.google.com/apis/maps/index.html>, "acedido em Junho de 2010".
- [36] João Pascoal Faria. Algoritmos em Grafos: Caminho mais curto. CPAL, 2006/2007, MIEIC, FEUP.
- [37] Darel Rex Finley. Point-In-Polygon Algorithm - Determining Whether A Point Is Inside A Complex Polygon. <http://alienryderflex.com/polygon/>, "acedido em Junho de 2010".

REFERÊNCIAS

- [38] Federal Aviation Administration United States. Aeronautical Information Manual: Official Guide to Basic Flight Information and ATC Procedures, Fevereiro de 2010. http://www.faa.gov/air_traffic/publications/ATPubs/AIM/aim.pdf, "acedido em Junho de 2010".
- [39] FIPA. FIPA Communicative Act Library Specification. Standard Component SC00037J, Foundation for Intelligent Physical Agents, 2, rue Bellot CH-1206 Geneve, Switzerland, March 2002.
- [40] Pedro Daniel Sousa, Daniel Castro Silva, and Luís Paulo Reis. Controlo de Tráfego Aéreo com o Microsoft Flight Simulator X. In Álvaro Rocha, Carlos Ferrás Sexto, Luís Paulo Reis, and Manuel Pérez Cota, editors, *Actas de la 5^a Conferencia Ibérica de Sistemas y Tecnologías de Información, 16–19 de Junho de 2010, Santiago de Compostela, Espanha*, pages 378–383, 2010.

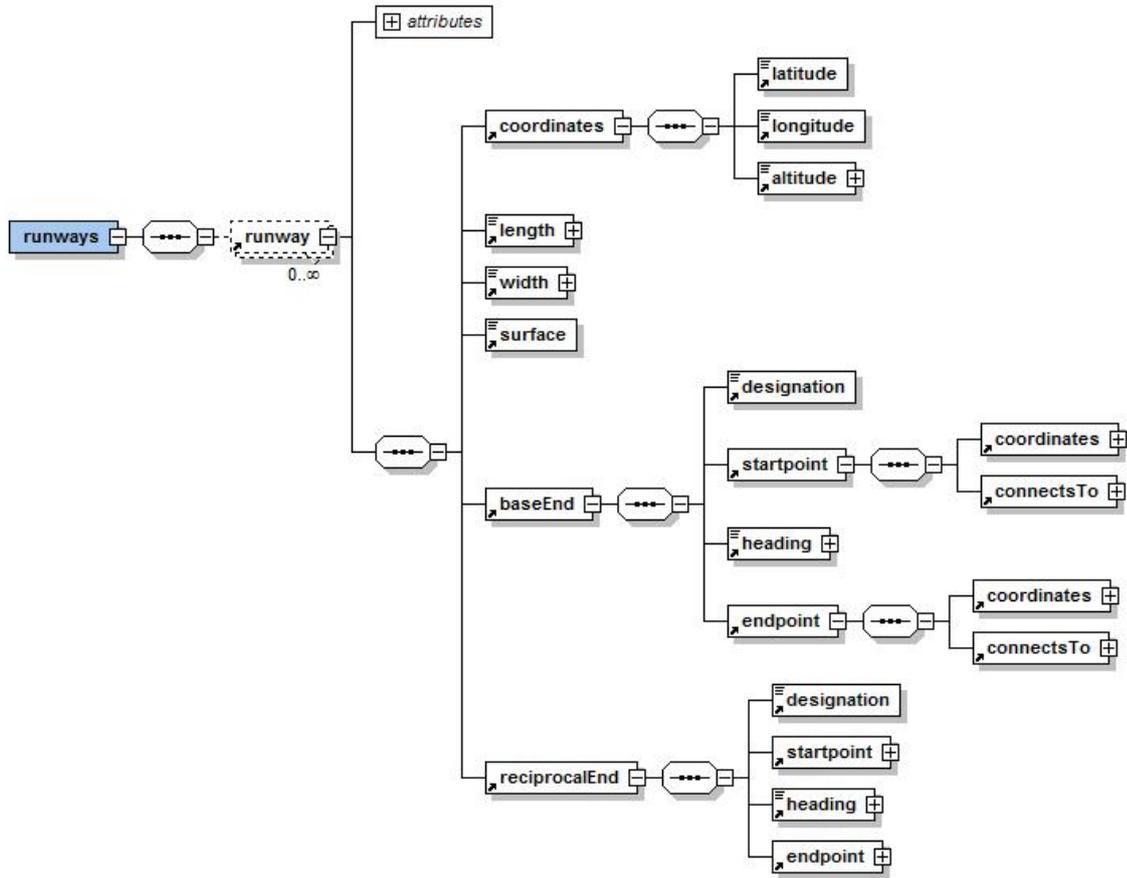
Anexo A

Estrutura do Ficheiro de Configuração do Aeroporto

Neste anexo são apresentados, em detalhe, os diversos campos internos à configuração de uma *Runway*, *Taxiway* e *ParkingSpace* que fazem parte da constituição de um aeroporto, cuja estrutura inicial já foi apresentada na Figura [6.3](#).

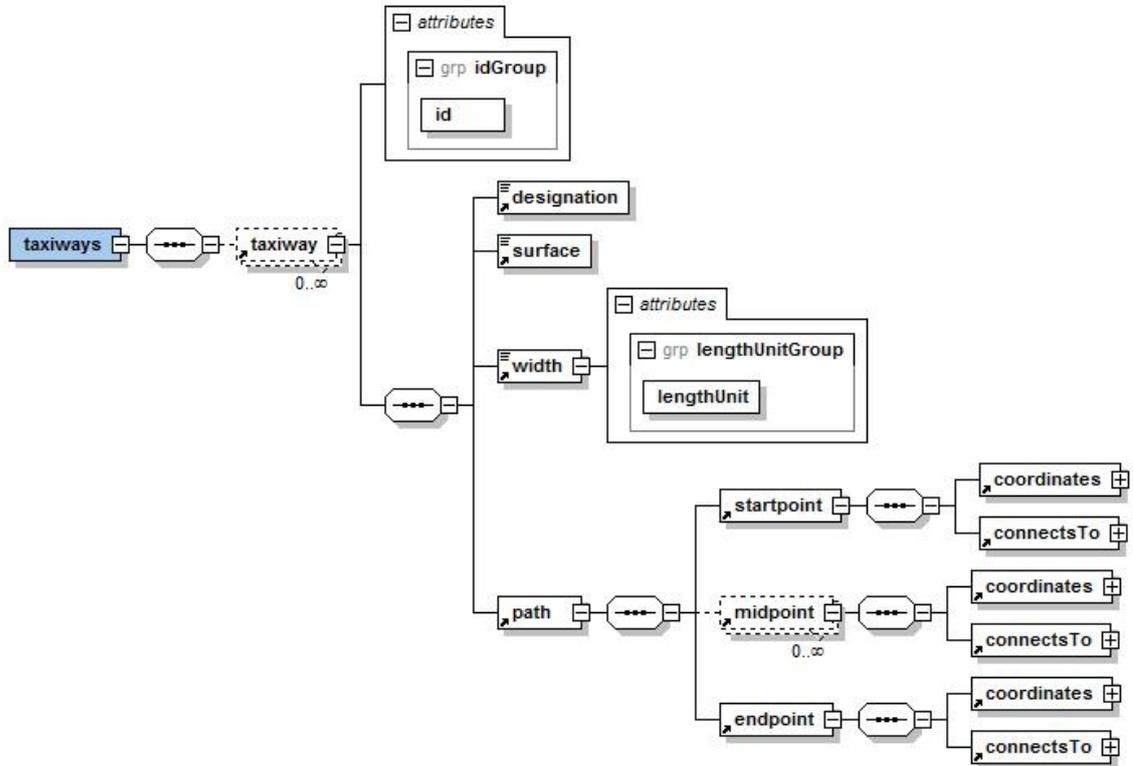
A.1 Configuração de *Runway*

Figura A.1: Campos para a Configuração de uma *Runway*



A.2 Configuração de *Taxiway*

Figura A.2: Campos para a Configuração de uma *Taxiway*



A.3 Configuração de ParkingSpace

Figura A.3: Campos para a Configuração de um ParkingSpaces

